

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

Departamento de Metodología de las Ciencias del Comportamiento



TESIS DOCTORAL

Análisis de incidentes operativos en sistemas complejos: actuación humana ante alarmas

Analysis of operational incidents in complex systems : human performance in alarm management

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

María Belén Torralba Martín

Directora

M^a Rosario Martínez Arias

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE METODOLOGÍA DE LAS CIENCIAS DEL COMPORTAMIENTO



TESIS DOCTORAL

**Análisis de incidentes operativos en sistemas complejos:
actuación humana ante alarmas**

**Analysis of operational incidents in complex systems:
human performance in alarm management**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA
PRESENTADA POR

M^a Belén Torralba Martín

Directora

M^a Rosario Martínez Arias

Madrid, 2015

Tabla de Contenido

RESUMEN

SUMMARY

INTRODUCCIÓN..... 1

1 LA SALA DE CONTROL EN EL CONTROL DE PROCESOS..... 5

1.1	SALA DE CONTROL CONVENCIONAL.....	7
1.2	PROCESO DE MODERNIZACIÓN DE LA SALA DE CONTROL CONVENCIONAL.....	8
1.2.1	<i>Participación del usuario final.....</i>	9
1.3	SALA DE CONTROL AVANZADA	10
1.4	IMPACTO DE LA INTRODUCCIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	12
1.5	SIMULADORES	15
1.6	APROXIMACIÓN REGULADORA AL TRATAMIENTO DE LOS FACTORES HUMANOS EN LA SALA DE CONTROL DE UNA CENTRAL NUCLEAR.....	17
1.6.1	<i>Regulación de factores humanos en centrales nucleares de Estados Unidos de América</i> 18	
1.6.1.1	NUREG-0800: Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants	19
1.6.1.2	NUREG-0711: Human factors engineering program review model.....	19
1.6.1.3	NUREG-0700: Human-system interface design review guidelines	21
1.6.1.4	NUREG-1764: Guidance for the review of changes to human actions	23
1.6.2	<i>Regulación de factores humanos en centrales nucleares de España.....</i>	23

2 EL OPERADOR EN LA SALA DE CONTROL..... 25

2.1	TIPOS DE TAREAS QUE DESEMPEÑA EL OPERADOR.....	26
2.2	ROL DEL OPERADOR EN FUNCIÓN DEL ESTADO DEL PROCESO	28
2.3	CAPACIDADES Y LIMITACIONES DEL SER HUMANO.....	31
2.3.1	<i>Capacidades del operador.....</i>	32
2.3.2	<i>Limitaciones del operador.....</i>	32
2.3.2.1	<i>Mecanismos de error humano.....</i>	34
2.3.3	<i>Tasa media de alarmas y su relación con el operador</i>	36
2.4	PROCEDIMIENTOS DE RESPUESTA A LA ALARMA Y DE OPERACIÓN DE EMERGENCIA	41

3 FILOSOFÍA BÁSICA DEL SISTEMA DE ALARMA EN LA SALA DE CONTROL..... 41

3.1	¿POR QUÉ ESTUDIAR LAS ALARMAS?	42
3.2	¿QUÉ ES UNA ALARMA?.....	44
3.2.1	<i>Aproximaciones a la definición de alarma</i>	44
3.2.2	<i>Concepto de anunciador, alerta, mensaje o estado en relación con alarma.....</i>	48
3.2.3	<i>Resumen del concepto de alarma</i>	48
3.3	¿QUÉ ES UN SISTEMA DE ALARMA?.....	49
3.3.1	<i>Definición de sistema de alarma</i>	49
3.3.1.1	<i>Resumen del término sistema de alarma</i>	55
3.3.2	<i>Características del sistema de alarma</i>	55

3.3.3	<i>Requisitos de alto nivel del sistema de alarma</i>	56
3.4	USOS DIVERSOS DE LA INFORMACIÓN DE ALARMA.....	58
3.4.1	<i>Implicaciones y resumen de los usos de las alarmas</i>	63
3.5	LAS FUNCIONES DEL SISTEMA DE ALARMA.....	65
3.5.1	<i>Función primaria y funciones secundarias del sistema de alarma</i>	65
3.5.1.1	Función primaria del sistema de alarma.....	65
3.5.1.2	Funciones secundarias del sistema de alarma	67
3.5.1.3	Resumen de las funciones del sistema de alarma.....	67
3.5.2	<i>Funciones de la anunciación</i>	68
4	APROXIMACIÓN REGULADORA, NORMATIVA Y PRÁCTICA RECOMENDADA PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS FACTORES HUMANOS EN LA INTERFAZ	70
4.1	PRINCIPIOS	70
4.2	DIRECTRICES	72
4.2.1	<i>Directrices del ámbito nuclear</i>	73
4.2.1.1	Guías y directrices sobre salas de control y sistemas de alarma de U.S. NRC.....	73
4.2.1.2	Guías y directrices sobre salas de control y sistemas de alarma de EPRI.....	76
4.2.1.3	Guías y directrices sobre sistemas de alarma del Proyecto Halden.....	77
4.2.2	<i>Directrices de salas de control y sistemas de alarma en la industria de procesos</i>	79
4.2.2.1	Engineered Equipment and Materials Users Association (EEMUA).....	79
4.2.3	<i>Directrices de sistemas de alarma: reuniones de especialistas en alarmas</i>	80
4.3	ESTÁNDARES	81
4.3.1	<i>Principales organismos dedicados a la estandarización</i>	82
4.3.2	<i>Características de los estándares: beneficios e inconvenientes</i>	83
4.3.3	<i>Orígenes de los estándares en el ámbito de los factores humanos</i>	84
4.3.4	<i>Principales estándares de factores humanos y salas de control</i>	85
4.3.4.1	Estándares de sistemas de alarma en centrales nucleares.....	85
4.3.4.2	Estándares de sistemas de alarma en la industria de proceso.....	88
4.3.4.2.1	The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA)	88
4.3.4.2.2	International Electrotechnical Commission (IEC).....	91
4.3.4.2.3	Occupational Safety and Health Administration (OSHA).....	92
4.4	GUÍAS DE ESTILO.....	92
5	DIFICULTADES Y PROBLEMAS DE LAS ALARMAS	93
5.1	PRINCIPALES PROBLEMAS DE LOS SISTEMAS DE ALARMA EN CENTRALES NUCLEARES	93
5.2	PROBLEMAS DE LAS ALARMAS EN OTROS DOMINIOS.....	97
5.3	CAUSAS DE LAS DEFICIENCIAS DE LAS ALARMAS.....	103
5.4	RESUMEN DE LOS PROBLEMAS DE LAS ALARMAS.....	105
6	INCIDENTS AND ACCIDENTS IN COMPLEX SYSTEMS RELATED WITH ALARM SYSTEM	107
6.1	INTRODUCTION	107
6.2	THREE MILE ISLAND UNIT 2 NUCLEAR POWER PLANT, UNITED STATES OF AMERICA	109
6.3	OFFSHORE PLATFORM PIPER ALPHA, NORTH SEA, UNITED KINGDOM	113
6.4	TEXACO MILFORD HAVEN REFINERY, UNITED KINGDOM	114
6.5	ESSO LONGFORD GAS PLANT, AUSTRALIA.....	115

6.6	BP TEXAS CITY REFINERY, UNITED STATES OF AMERICA.....	116
6.7	SPANAIR FLIGHT JK 5022, SPAIN	118
6.8	ADDITIONAL INCIDENTS AND ACCIDENTS WITH THE ALARM SYSTEM AS A CONTRIBUTING FACTOR	119
7	EL SISTEMA DE ALARMA EN LA CENTRAL NUCLEAR.....	120
7.1	PRESENTACIÓN DE ALARMAS EN LA SALA DE CONTROL.....	121
7.1.1	<i>Principales formas de presentar las alarmas en la sala de control.....</i>	<i>121</i>
7.1.2	<i>Preferencia de los operadores sobre el formato de presentación de alarmas.....</i>	<i>122</i>
7.1.3	<i>Formato de presentación recomendado de alarmas.....</i>	<i>123</i>
7.2	SISTEMA DE ALARMA CONVENCIONAL EN PANEL ANUNCIADOR.....	123
7.3	SISTEMA DE ALARMA COMPUTARIZADO Y AVANZADO.....	126
7.3.1	<i>Listas de mensaje de alarmas</i>	<i>131</i>
7.3.2	<i>Alarmas integradas en las pantallas del proceso.....</i>	<i>132</i>
7.4	INTERACCIÓN DEL OPERADOR CON EL SISTEMA DE ALARMA	133
7.4.1	<i>Secuencia de los controles SART.....</i>	<i>135</i>
8	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE RELATIVO A LAS HIPÓTESIS Y LAS PREDICCIONES DEL ESTUDIO.....	137
8.1	INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMA DE ALARMA DE KRAGT.....	137
8.2	EXPERIMENTOS DEL PROYECTO HALDEN DE LA OCDE CON SISTEMAS DE ALARMA.....	138
8.2.1	<i>Experimentos del Proyecto Halden con el sistema de alarma HALO</i>	<i>138</i>
8.2.1.1	<i>Primer estudio del sistema de alarma HALO</i>	<i>138</i>
8.2.1.2	<i>Segundo estudio del sistema de alarma HALO.....</i>	<i>138</i>
8.2.1.3	<i>Tercer estudio del sistema de alarma HALO.....</i>	<i>139</i>
8.2.1.4	<i>Resumen de los experimentos con el sistema de alarma HALO.....</i>	<i>141</i>
8.2.2	<i>Investigación del Proyecto Halden relacionada con el sistema de alarma CASH.....</i>	<i>141</i>
8.2.2.1	<i>Comentarios de los operadores al diseño de la interfaz del sistema de alarma CASH</i>	<i>141</i>
8.2.2.2	<i>Lecciones aprendidas y recomendaciones de los diseñadores del sistema de alarma CASH</i>	<i>142</i>
8.2.2.3	<i>Evaluación de factores humanos del sistema de alarma CASH en HAMMLAB</i>	<i>143</i>
8.2.2.4	<i>Experimento del Proyecto Halden sobre el uso del sistema de alarma.....</i>	<i>144</i>
8.3	ESTUDIOS SOBRE SISTEMAS DE ALARMA DE U.S. NRC.....	145
8.3.1	<i>Investigación de Danchak sobre el contenido del mensaje de alarma</i>	<i>145</i>
8.3.2	<i>Experimentación de U.S. NRC sobre sistemas de alarma en las instalaciones del Proyecto del Reactor Halden.....</i>	<i>147</i>
8.3.3	<i>Investigación sobre el sistema de alarma AWARE.....</i>	<i>151</i>
8.3.4	<i>Resumen de la investigación sobre sistemas de alarma de U.S. NRC.....</i>	<i>153</i>
8.4	INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA PATROCINADA POR EPRI.....	153
8.5	INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA DESARROLLADA POR STANTON Y COLABORADORES.....	156
8.6	EVALUACIÓN DE SISTEMA DE ALARMA EN UNA SALA AVANZADA DE MATSUSHITA ET AL.	160
8.7	ESTUDIOS DE CAMPO SOBRE MONITORIZACIÓN EN OPERACIÓN NORMAL DE VICENTE ET AL.	160

8.8	INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA LLEVADA A CABO POR LA UNIVERSIDAD DE CHALMERS	164
8.9	ESTUDIOS ERGONÓMICOS REALIZADOS POR EL INSTITUTO DE INGENIERÍA NUCLEAR DE BRASIL	166
8.10	INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA DE KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE (KAERI).....	167
8.11	INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS DE ALARMA DE TORRALBA ET AL. DE CIEMAT	168
8.12	ESTUDIO PRINCIPAL DE LA TESIS: OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	170
8.12.1	<i>Objetivos de la investigación</i>	170
8.12.2	<i>Hipótesis del estudio</i>	171
9	MÉTODO.....	173
9.1	PARTICIPANTES.....	173
9.2	PROCEDIMIENTO.....	174
9.3	MEDIDAS.....	175
9.3.1	<i>Seguimiento de movimientos oculares</i>	175
9.3.1.1	¿Qué son los movimientos oculares?.....	175
9.3.1.2	Hipótesis ojo-mente	176
9.3.1.3	Unidad de análisis de las fijaciones: área de interés.....	177
9.3.2	<i>Registros del simulador</i>	177
9.3.2.1	Registro de variables del simulador	178
9.3.2.2	Registro de experimentadores del simulador	178
9.3.3	<i>Registro de ocurrencias</i>	179
9.4	DISEÑO.....	179
9.4.1	<i>Variables dependientes</i>	180
9.4.1.1	Fijaciones en el área de interés: frecuencia y duración.....	180
9.4.1.1.1	Datos de frecuencia	180
9.4.1.1.2	Datos de duración	180
9.4.1.2	Tiempo de detección de la anomalía	180
9.4.1.3	Fuente de información de la interfaz para detectar la anomalía	180
9.4.2	<i>Variables independientes</i>	180
9.4.2.1	Áreas de interés de la interfaz.....	180
9.4.2.1.1	Definición de las áreas de interés en el estudio principal.....	181
9.4.2.1.2	Disposición de las áreas de interés en el teclado sensible al tacto.....	183
9.4.2.2	Escenarios	184
9.4.2.2.1	Descripción de los escenarios.....	185
9.4.2.2.2	Orden de presentación de los escenarios	191
9.4.2.2.3	Criterios para la puntuación de datos en los escenarios	191
9.4.2.3	Acciones de gestión de la alarma	192
9.4.2.4	Rol del operador	192
9.5	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL: APARATOS EMPLEADOS EN EL EXPERIMENTO	193
9.5.1	<i>Simulador NORS</i>	193
9.5.1.1	Descripción genérica del funcionamiento de un reactor de agua a presión.....	194
9.5.1.2	Principales características del proceso de la planta simulado en PWR NORS....	194
9.5.1.3	Principales sistemas de NORS.....	195

9.5.1.4	Sistemas automáticos en NORS.....	196
9.5.1.5	Facilidad de uso del simulador NORS.....	196
9.5.2	<i>Sala de control de HAMMLAB.....</i>	<i>197</i>
9.5.2.1	Disposición general de la sala de control	198
9.5.2.2	Display de visión general en pantalla de gran tamaño.....	199
9.5.2.3	Sistema de alarma CASH	201
9.5.2.3.1	Display del sistema de alarma en ventanillas	201
9.5.2.3.2	Display del sistema de alarma en lista de alarmas.....	202
9.5.2.3.3	Acciones de reconocer, silenciar y comprimir la alarma en el sistema CASH 205	
9.5.2.3.4	Procesamiento de alarmas en el sistema CASH	206
9.5.2.4	Display de curvas de tendencias.....	206
9.5.2.5	Display de visión general de los sistemas del control automático	207
9.5.2.6	Display ALDIV.....	207
9.5.2.7	Display de curvas de tendencias.....	208
9.5.2.8	Display de formatos del proceso NORS	208
9.5.3	<i>Evaluación de la interfaz de NORS en HAMMLAB.....</i>	<i>211</i>
9.5.3.1	Evaluación de factores humanos de la interfaz de NORS en HAMMLAB	211
9.5.3.2	Experiencias de usuarios en la sala de control del experimento de automatización 212	
9.5.4	<i>Equipos de recogida y análisis de datos experimentales</i>	<i>213</i>
9.5.4.1	Galería de los experimentadores	213
9.5.4.2	Grabaciones de audio y vídeo.....	214
9.5.4.3	Equipo de seguimiento de movimientos oculares	214
9.5.4.3.1	Equipo de recogida de datos de movimientos oculares.....	214
9.5.4.3.2	Equipo de puntuación de datos de movimientos oculares	215
9.5.4.3.3	Limitaciones de los datos de seguimiento de movimientos oculares.....	216
9.6	ANÁLISIS DE DATOS	217
9.6.1	<i>Procesamiento de los datos.....</i>	<i>217</i>
9.6.2	<i>Técnicas de análisis de datos.....</i>	<i>217</i>
10	RESULTS.....	219
10.1	DESCRIPTIVE STATISTICS	220
10.1.1	<i>Descriptive statistics of frequency and duration data of alarm areas of interest.....</i>	<i>220</i>
10.1.1.1	Exploring frequency results of alarm AOIs based on operator role	221
10.1.1.2	Exploring duration results of alarm AOIs based on operator role	222
10.1.1.3	Average of frequency and duration data of alarm AOIs.....	224
10.1.2	<i>Descriptive statistics of frequency and duration data of thirty and twelve AOIs.....</i>	<i>224</i>
10.1.2.1	Descriptive analyses of frequency data of 12 AOIs	225
10.1.2.1.1	Frequency data of 12 AOIs in scenario 1.....	225
10.1.2.1.2	Frequency data of 12 AOIs in scenario 2.....	226
10.1.2.1.3	Frequency data of 12 AOIs in scenario 3.....	227
10.1.2.2	Descriptive analyses of duration data of 12 AOIs.....	228
10.1.2.2.1	Duration data of 12 AOIs in scenario 1.....	228
10.1.2.2.2	Duration data of 12 AOIs in scenario 2.....	229
10.1.2.2.3	Duration data of 12 AOIs in scenario 3.....	230

10.1.2.3	Average of frequency and duration data of twelve AOIs of the HSL.....	231
10.1.3	<i>Descriptive statistics of frequency and duration data of process formats, large screen overview, trends and alarm system.....</i>	232
10.1.4	<i>Descriptive statistics of actions in human-system interface</i>	235
10.1.4.1	Descriptive statistics of selection of process formats and trends	235
10.1.4.2	Descriptive statistics of alarm handling actions	236
10.2	PEARSON CORRELATIONS BETWEEN FREQUENCY AND DURATION DATA FOR TOTAL SCENARIO TIME.....	238
10.2.1	<i>Pearson correlations between frequency and duration data of each alarm area of interest</i>	238
10.2.1.1	Pearson correlations of frequency and duration data of alarm areas of interest across scenarios	238
10.2.1.2	Pearson correlations of frequency and duration data of alarm areas of interest in three scenarios	239
10.2.1.3	Summary of results of Pearson correlations of frequency and duration of each alarm area of interest.....	240
10.2.2	<i>Pearson correlations of frequency and duration data between all alarm areas of interest</i>	240
10.2.2.1	Pearson correlations of frequency and duration data between all alarm areas of interest across scenarios	240
10.2.2.2	Pearson correlations of frequency and duration data between all alarm areas of interest within scenarios	242
10.2.2.3	Summary of results of Pearson correlations between all alarm areas of interest.	248
10.2.3	<i>Summary of results of Pearson correlations.....</i>	249
10.3	NORMALITY TESTS.....	250
10.3.1	<i>Normality tests of the alarm areas of interest frequency data</i>	250
10.3.1.1	Normality tests of frequency data in total scenario time	250
10.3.1.2	Normality tests of frequency data for the scenario periods	252
10.3.2	<i>Normality test of the alarm areas of interest duration data</i>	252
10.3.2.1	Normality tests of duration data in total scenario time	252
10.3.2.2	Normality tests of duration data for the scenario periods.....	254
10.3.3	<i>Summary of results of normality tests.....</i>	254
10.4	SCENARIO RUN ORDER.....	255
10.4.1	<i>Hypothesis on scenario run order.....</i>	255
10.4.2	<i>Data analyses of scenario run order.....</i>	255
10.4.3	<i>Summary of results of scenario run order.....</i>	256
10.5	OPERATOR ROLE	256
10.5.1	<i>Hypothesis on operator role</i>	256
10.5.2	<i>Data analyses on operator role</i>	256
10.5.2.1	Data analyses with Student t-test.....	257
10.5.2.1.1	Analysis of frequency data with Student t-test.....	257
10.5.2.1.2	Analyses of duration data with Student t-test.....	259
10.5.2.1.3	Summary of results of frequency and duration data with Student t-test.....	260
10.5.2.2	Data analyses with ANOVA.....	261
10.5.2.3	Data analyses with non-parametric Mann-Whitney (MW) U test.....	262
10.5.2.3.1	Summary of results of non-parametric tests related to operator role	264

10.5.3	<i>Summary of results on operator role</i>	264
10.6	HYPOTHESIS 1 ON PERCENTAGE OF TIME SPENT MONITORING THE ALARM SYSTEM AREAS OF INTEREST	264
10.6.1	<i>Hypothesis on percentage of time</i>	264
10.6.2	<i>Data analyses of percentage of time</i>	265
10.6.3	<i>Summary of results of percentage of time</i>	266
10.7	HYPOTHESES 2 AND 3 RELATED TO OPERATOR'S DETECTION TIME	266
10.7.1	<i>Predictions and hypotheses on detection time</i>	266
10.7.2	<i>Data analyses of detection time</i>	266
10.7.2.1	Analysis of detection time with an associated alarm	266
10.7.2.2	Analysis of detection time in the absence of an alarm	268
10.7.3	<i>Summary of results on detection time</i>	270
10.8	HYPOTHESIS 4 ON THE INFORMATION SOURCE FOR THE DETECTION TASK	270
10.8.1	<i>Hypothesis and research question on information source</i>	271
10.8.2	<i>Data analyses of information source</i>	271
10.8.3	<i>Summary of results on information source</i>	273
10.9	HYPOTHESIS 5 ON THE DIVERSE ROLES OF THE ALARM SYSTEM	273
10.9.1	<i>Hypothesis on roles of alarm system</i>	273
10.9.2	<i>Data analysis of roles of alarm system</i>	273
10.9.3	<i>Summary of results of roles of alarm system</i>	278
10.10	HYPOTHESIS 6 ON QUADRATIC TREND ON DETECTION PHASE	278
10.10.1	<i>Hypothesis on quadratic trend</i>	278
10.10.2	<i>Data analysis of quadratic trend</i>	278
10.10.3	<i>Summary of results of quadratic trend</i>	280
10.11	HYPOTHESES 7 AND 8 RELATED TO AN EQUALLY DISTRIBUTION OF DATA FOR EACH CREW IN ALL SCENARIOS	280
10.11.1	<i>Hypotheses on homogeneity of alarm distribution data</i>	280
10.11.2	<i>Data analyses of homogeneity, with ANOVA for total scenario time</i>	280
10.11.2.1	Number of visual accesses to alarm areas of interest with between scenario design	281
10.11.2.1.1	Number of visual accesses to alarm system	281
10.11.2.1.2	Number of visual accesses to alarm tile	283
10.11.2.1.3	Number of visual accesses to alarm list	284
10.11.2.1.4	Number of visual accesses to alarm tag	285
10.11.2.1.5	Number of visual accesses to alarm text	286
10.11.2.1.6	Number of visual accesses to alarm value	287
10.11.2.1.7	Number of visual accesses to time and other parts of alarm list	289
10.11.2.1.8	Summary of main results of number of visual accesses to alarm areas of interest across three scenarios	290
10.11.2.2	Percentage of time gazing at alarm areas of interest with between scenario design	291
10.11.2.2.1	Percentage of time gazing at alarm system	291
10.11.2.2.2	Percentage of time gazing at alarm tile	292
10.11.2.2.3	Percentage of time gazing at alarm list	293
10.11.2.2.4	Percentage of time gazing at alarm tag	294
10.11.2.2.5	Percentage of time gazing at alarm text	295

10.11.2.2.6	Percentage of time gazing at alarm value	296
10.11.2.2.7	Percentage of time gazing at time and other parts of alarm list.....	297
10.11.2.2.8	Summary of main results of the percentage of time gazing at alarm areas of interest across three scenarios	299
10.11.3	<i>Summary of results of hypotheses of homogeneity of alarm distribution data</i>	299
10.12	HYPOTHESES 9 AND 10 ON FREQUENCY AND DURATION DATA ON ALARMLIST VERSUS ALARM TILE.....	300
10.12.1	<i>Hypotheses on frequency and duration data of alarm list versus alarm tile</i>	300
10.12.2	<i>Data analyses of frequency and duration data of alarm list versus alarm tile.....</i>	300
10.12.2.1	Descriptive statistics of alarm list and alarm tile	300
10.12.2.1.1	Descriptive statistics of frequency data of alarm list and alarm tile	300
10.12.2.1.2	Descriptive statistics of duration data of alarm list and alarm tile	302
10.12.2.2	ANOVA analyses of the number of visual accesses to two alarm areas of interest	303
10.12.2.2.1	ANOVA analyses of frequency data of two alarm areas of interest for total scenario time	303
10.12.2.2.2	ANOVA analyses of frequency data of two alarm areas of interest for the scenario periods	307
10.12.2.3	ANOVA analyses of the percentage of time gazing at two alarm areas of interest	310
10.12.2.3.1	ANOVA analyses of duration data of two alarm areas of interest for total scenario time	310
10.12.2.3.2	ANOVA analyses of duration data of two alarm areas of interest for the scenario periods	315
10.12.2.4	ANOVA analyses of the number of visual accesses to five alarm areas of interest	319
10.12.2.4.1	ANOVA analyses of frequency data of five alarm areas of interest for total scenario time	319
10.12.2.4.2	ANOVA analyses of frequency data of five alarm areas of interest for scenario periods	324
10.12.2.4.3	Summary of results of frequency data of five AOIs during scenario periods	329
10.12.2.4.4	ANOVA analyses of percentage of time gazing at five alarm areas of interest for total scenario time.....	329
10.12.2.4.5	Summary of results of ANOVA of five AOIs for total scenario time.....	334
10.12.2.4.6	ANOVA analyses of duration data of five alarm areas of interest for scenario periods	334
10.12.2.4.7	Summary of results of duration data of five AOIs during scenario periods ..	339
10.12.3	<i>Summary of results of hypotheses on alarm list versus alarm tile.....</i>	340
10.13	HYPOTHESIS 11 ON THE USE OF ALARMTEXT VERSUS ALARM TAG.....	340
10.13.1	<i>Hypothesis on alarm text versus alarm tag.....</i>	340
10.13.2	<i>Data analyses of alarm text versus alarm tag.....</i>	340
10.13.2.1	Descriptive statistics	341
10.13.2.1.1	Descriptive statistics of operator experience and age.....	341
10.13.2.1.2	Descriptive statistics of alarm text versus alarm tag.....	341
10.13.2.1.3	Summary of results	344
10.13.2.2	ANOVA analyses of five alarm AOIs	344

10.13.2.3	ANOVAs analyses for alarm text and alarm tag areas of interest.....	344
10.13.2.3.1	ANOVA analyses of frequency data to test operators' experience and use of alarm text versus alarm tag	345
10.13.2.3.2	ANOVA analyses of duration data to test operators' experience and use of alarm text versus alarm tag	350
10.13.2.4	Summary of results of alarm AOI (alarm tag and text) and operator experience	356
10.13.3	Summary of results of alarm text versus alarm tag	357
10.14	HYPOTHESES 12 AND 13 ON ALARM HANDLING ACTIONS.....	357
10.14.1	Description of alarm handling actions.....	357
10.14.2	Hypotheses and predictions on alarm handling actions	358
10.14.3	Data analyses of alarm handling actions	358
10.14.3.1	Data analyses of alarm handling related to amount of operators' actions	358
10.14.3.1.1	Descriptive statistics.....	358
10.14.3.1.2	Pearson correlations	362
10.14.3.1.3	Analysis of operators' actions for alarm handling with ANOVA	363
10.14.3.1.4	Summary of results of amount of alarm handling actions	364
10.14.3.2	Data analyses on alarm handling related to the use of controls for all alarms versus alarm based on operator position.....	364
10.14.3.2.1	Descriptive statistics of individual and global alarm handling actions	364
10.14.3.2.2	Analysis of operators individual and global actions for alarm handling with ANOVA	365
10.14.3.2.3	Summary of results of alarm treatment actions: global versus individual.....	366
10.14.3.3	Summary of results of hypotheses related to alarm handling actions	366
11	DISCUSSION OF RESULTS, LIMITATIONS, AND FUTURE WORK.....	367
11.1	DISCUSSION OF RESULTS.....	367
11.2	LIMITATIONS OF THE STUDY	385
11.3	FUTURE WORK.....	387
12	REFERENCES.....	388

Índice de tablas

Tabla 1-1. Elementos del Modelo de Revisión del Programa de Factores Humanos del NUREG-0711 (O'Hara et al., 2012)	20
Tabla 1-2. Principales Partes y Secciones del NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b)	22
Tabla 2-1. Puestos de Trabajo en la Sala de Control (Adaptada de IAEA, 2006)	26
Tabla 2-2. Rol del Operador en Diferentes Estados de la Planta (EEMUA, 1999)	29
Tabla 2-3. Evaluación de la Tasa Media de Alarmas (EEMUA, 1999)	37
Tabla 2-4. Guía Sobre la Tasa de Alarmas Tras una Anomalía (EEMUA, 1999).....	37
Tabla 2-5. Distribución de Alarmas por Prioridad (EEMUA, 1999)	37
Tabla 2-6. Medidas de Alarmas Anunciadas Proporcionadas por EEMUA en Comparación con las Medidas de Matrikon Inc (Rothenberg, 2009)	38
Tabla 2-7. Niveles de Rendimiento del Sistema de Alarma (Campbell Brown, 2003).....	40
Tabla 2-8. Resumen de las Medidas de Actuación de Alarmas (ANSI/ISA-18.2-2009)	40

Tabla 3-1. Características de un Buen Sistema de Alarma (EEMUA, 1999)	56
Tabla 3-2. Requisitos de Alto Nivel del Sistema de Alarma (EPRI, 2005)	57
Tabla 3-3. Resumen de las Funciones de la Anunciación (Davey et al., 1992)	68
Tabla 3-4. Requisitos Funcionales de la Anunciación (Davey y Lane, 2001)	69
Tabla 4-1. Principios Generales para el Diseño de Sistema (Shneiderman, 1992).....	70
Tabla 4-2. Principios Generales de Factores Humanos Importantes para el Diseño del Sistema de Alarma (Førdestrømmen et al., 1994)	71
Tabla 4-3. Cuatro Principios Clave del Sistema de Alarma (EEMUA, 1999).....	72
Tabla 4-4. Directrices en el Ámbito Militar y de Aviación de Estados Unidos	73
Tabla 4-5. Guías y Directrices Sobre Salas de Control y Sistemas de Alarma de U.S. NRC.....	74
Tabla 4-6. Guías y Directrices Sobre Salas de Control y Sistemas de Alarma de EPRI.....	77
Tabla 4-7. Principales Estándares para el Diseño y la Evaluación de Sistemas.....	86
Tabla 5-1. Problemas de Gestión de Alarmas que Pueden Abordarse con la Gestión del Ciclo de Vida de ISA-18.2 (exida, 2009; ISA, 2009; Siemens, 2010)	105
Tabla 7-1. Estados de la Alarma (Stanton y Baber, 1995)	136
Tabla 8-1. Comentarios de los Operadores al Sistema de Alarma CASH (Moum et al., 1998)	141
Tabla 8-2. Comentarios de Operadores al Contenido de la Lista de Alarmas (Moum et al., 1998)	142
Tabla 8-3. Recomendaciones de Diseñadores del Sistema de Alarma CASH (Moum et al., 1998) ...	143
Tabla 8-4. Resultado de la Evaluación de la Interfaz del Sistema de Alarma CASH (Sebok et al., 1999)	144
Tabla 8-5. Descripción de las Actividades Iniciadas por la Alarma (AIA) del Modelo de Stanton et al.	157
Tabla 9-1. Edad y Experiencia de los Operadores.....	173
Tabla 9-2. Programación de la Toma de Datos (Hollangel y Miberg, 1999).....	174
Tabla 9-3. Registro de Experimentadores del Simulador	178
Tabla 9-4. Definición de Áreas de Interés del Estudio	181
Tabla 9-5. Principales Características de los Escenarios (Hollangel y Miberg, 1999)	184
Tabla 9-6. Situación Inicial de la Planta en el Escenario 1.....	185
Tabla 9-7. Situación Inicial de la Planta en el Escenario 2.....	187
Tabla 9-8. Situación Inicial del Proceso en el Escenario 3.....	189
Tabla 9-9. Orden de Presentación de los Escenarios (Miberg, 1998b)	191
Tabla 9-10. Responsabilidades y Tareas del Equipo de Operación	192
Tabla 9-11. Disposición del Contenido del Mensaje de Alarma en la Lista de Alarmas.....	204
Tabla 9-12. Identificación de la Alarma para Parámetros y Componentes (Førdestrømmen et al., 1994; Torralba, 1994a, 1994b)	204
Tabla 9-13. Opiniones de los Operadores sobre la Interfaz de la Sala de Control HAMMLAB (Saarni et al., 2001)	212
Tabla 9-14. Extracto de las Hojas de Registro de EyeCon.....	216
Table 10-1. Frequency Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1.....	221
Table 10-2. Frequency Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2.....	221
Table 10-3. Frequency Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3.....	221
Table 10-4. Frequency Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1	222
Table 10-5. Frequency Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2	222
Table 10-6. Frequency Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3	222
Table 10-7. Duration Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1	222
Table 10-8. Duration Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2	223

Table 10-9. Duration Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3	223
Table 10-10. Duration Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1	223
Table 10-11. Duration Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2	223
Table 10-12. Duration Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3	224
Table 10-13. Selection of Process Formats in Three Scenarios	235
Table 10-14. Selection of Different Process Formats in Scenarios	236
Table 10-15. Selection of Trends Formats in Three Scenarios	236
Table 10-16. Descriptive Statistics of Alarm Handling Actions	237
Table 10-17. Pearson Correlations between Frequency and Duration Data across Scenarios	238
Table 10-18. Pearson Correlations between Frequency and Duration Data across Scenarios by Operator Role	238
Table 10-19. Pearson Correlations between Frequency and Duration Data for Three Scenarios	239
Table 10-20. Pearson Correlations between Frequency and Duration Data by Operator Role for Three Scenarios	239
Table 10-21. Summary of Pearson Correlations between Frequency and Duration Data	240
Table 10-22. Pearson Correlations between Frequency Data across Scenarios	241
Table 10-23. Pearson Correlations between Duration Data across Scenarios	241
Table 10-24. Pearson Correlations between Frequency Data across Scenarios by Operator Role	241
Table 10-25. Pearson Correlations between Duration Data across Scenarios by Operator Role	242
Table 10-26. Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 1	243
Table 10-27. Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 1	243
Table 10-28. Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 2	243
Table 10-29. Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 2	244
Table 10-30. Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 3	244
Table 10-31. Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 3	244
Table 10-32. Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 1 by Operator Role	245
Table 10-33. Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 1 by Operator Role	245
Table 10-34. Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 2 by Operator Role	246
Table 10-35. Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 2 by Operator Role	246
Table 10-36. Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 3 by Operator Role	247
Table 10-37. Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 3 by Operator Role	247
Table 10-38. Summary of Pearson Correlations between Frequency and Duration Data of Alarm AOIs	249
Table 10-39. Normality Tests of Alarm Areas of Interest Frequency Data in All Scenarios	250
Table 10-40. Normality Tests of Alarm Areas of Interest Frequency Data Based on Operator Role in All Scenarios	251
Table 10-41. Normality Tests of Alarm Areas of Interest Duration Data in All Scenarios	252
Table 10-42. Normality Tests of Alarm Areas of Interest Duration Data Based on Operator Role in All Scenarios	253
Table 10-43. Run Order of Three Scenarios	255
Table 10-44. F Values Required for the Significance and df	255
Table 10-45. Run Order Effect, Crew Effect and Interaction Effect in Frequency Data in Three Scenarios	255
Table 10-46. Run Order Effect, Crew Effect and Interaction Effect in Duration Data in Three Scenarios	256
Table 10-47. Student t-test for Frequency Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm System	257

Table 10-48. Student t-test for Frequency Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm List and Tile	257
Table 10-49. Student t-test for Frequency Data of Reactor and Turbine Operators on 5 Alarm AOIs	258
Table 10-50. Student t-test for Duration Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm System.	259
Table 10-51. Student t-test for Duration Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm List and Alarm Tile	259
Table 10-52. Student t-test for Duration Data of Reactor and Turbine Operators on 5 Alarm AOIs.	260
Table 10-53. Summary of Results of Analysis of Frequency Data with Student t-test	261
Table 10-54. Summary of Results of Duration Data with Student t-test.....	261
Table 10-55. Descriptive Statistics and Contrasts of Operator Role with Mann-Whitney U test.....	263
Table 10-56. Summary of the Operator Role Effects in Three Scenarios with Non-Parametric Tests	264
Table 10-57. Descriptive Statistics for Duration Data of Alarm System in Three Scenarios	265
Table 10-58. Descriptive Statistics for Frequency Data of Alarm System in Three Scenarios	265
Table 10-59. Detection Time of Malfunctions	267
Table 10-60. Detection Time of Crews	268
Table 10-61. Detection Time without an Alarm Indication.....	268
Table 10-62. Summary of Main Effects (Lineal, Quadratic and Cubic) in Scenarios 1, 2 and 3.....	280
Table 10-63. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	281
Table 10-64. Alarm System (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	281
Table 10-65. Means and SD of Alarm System by Operator Role	281
Table 10-66. Alarm System by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios	282
Table 10-67. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm System in Scenarios 1, 2 and 3.....	283
Table 10-68. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	283
Table 10-69. Alarm Tile (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	283
Table 10-70. Means and SD of Alarm Tile by Operator Role	283
Table 10-71. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Tile in Scenarios 1, 2 and 3.....	284
Table 10-72. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	284
Table 10-73. Alarm List (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	284
Table 10-74. Means and SD of Alarm List by Operator Role	284
Table 10-75. Alarm List by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios	284
Table 10-76. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3.....	285
Table 10-77. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	285
Table 10-78. Alarm Tag (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	285
Table 10-79. Means and SD of Alarm Tag by Operator Role	285
Table 10-80. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Tag in Scenarios 1, 2 and 3.....	286
Table 10-81. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	286
Table 10-82. Alarm Text (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	286
Table 10-83. Means and SD of Alarm Text by Operator Role	286
Table 10-84. Alarm Text by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios	287
Table 10-85. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Text in Scenarios 1, 2 and 3.....	287
Table 10-86. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	288

Table 10-87. Alarm Value (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	288
Table 10-88. Means and SD of Alarm Value by Operator Role	288
Table 10-89. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Value in Scenarios 1, 2 and 3.....	288
Table 10-90. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	289
Table 10-91. Time and Others (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	289
Table 10-92. Means and SD of Time and Other Parts of Alarm List by Operator Role	289
Table 10-93. Time and Other Parts of Alarm List by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios	289
Table 10-94. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Time and Other Parts of Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3.....	290
Table 10-95. Main Results of Frequency Data of All Alarm Areas of Interest across Scenarios	291
Table 10-96. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	291
Table 10-97. Alarm System (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	291
Table 10-98. Means and SD of Alarm System by Operator Role	291
Table 10-99. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm System in Scenarios 1, 2 and 3.....	292
Table 10-100. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	292
Table 10-101. Alarm Tile (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	292
Table 10-102. Means and SD of Alarm Tile by Operator Role	292
Table 10-103. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Tile in Scenarios 1, 2 and 3.....	293
Table 10-104. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	293
Table 10-105. Alarm List (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	293
Table 10-106. Means and SD of Alarm List by Operator Role.....	293
Table 10-107. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3.....	294
Table 10-108. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	294
Table 10-109. Alarm Tag (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	294
Table 10-110. Means and SD of Alarm Tag by Operator Role.....	294
Table 10-111. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Tag in Scenarios 1, 2 and 3.....	295
Table 10-112. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	295
Table 10-113. Alarm Text (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	295
Table 10-114. Means and SD of Alarm Text by Operator Role	295
Table 10-115. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Text in Scenarios 1, 2 and 3.....	296
Table 10-116. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	296
Table 10-117. Alarm Value (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3.....	296
Table 10-118. Means and SD of Alarm Value by Operator Role	296
Table 10-119. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Value in Scenarios 1, 2 and 3.....	297
Table 10-120. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	297
Table 10-121. Time and Others (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3	297
Table 10-122. Means and SD of Time and Other Parts of Alarm List by Operator Role	297

Table 10-123. Time and Other Parts of Alarm List by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios	298
Table 10-124. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Time and Other Parts of Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3.....	298
Table 10-125. Main Results of Duration Data of Alarm Areas of Interest across Scenarios	299
Table 10-126. Descriptive Statistics of Crews for Frequency Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios	300
Table 10-127. Descriptive Statistics of Reactor Operators for Frequency Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios	301
Table 10-128. Descriptive Statistics of Turbine Operators for Frequency Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios	301
Table 10-129. Descriptive Statistics of Crew Duration Data on Alarm List versus Alarm Tile in Three Scenarios	302
Table 10-130. Descriptive Statistics of the Reactor Operators for Duration Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios	302
Table 10-131. Descriptive Statistics of the Turbine Operators for Duration Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios	302
Table 10-132. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1	303
Table 10-133. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 1.....	303
Table 10-134. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 1.....	304
Table 10-135. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2	304
Table 10-136. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 2.....	304
Table 10-137. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 2.....	304
Table 10-138. Alarm System (Alarm List – Alarm Tile) by Operator (Interaction) Effect in Scenario 2	305
Table 10-139. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3	305
Table 10-140. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 3.....	305
Table 10-141. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 3.....	306
Table 10-142. Power and Effect Size of 2 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Frequency)	306
Table 10-143. Main Results of Frequency Data of Alarm Displays	307
Table 10-144. Main Results of Frequency Data for 33 Periods of Scenario 1 in Two AOIs	307
Table 10-145. Main Results of Frequency Data for 30 Periods of Scenario 2 in Two AOIs	308
Table 10-146. Main Results of Frequency Data for 31 Periods of Scenario 3.....	309
Table 10-147. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1	311
Table 10-148. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 1	311
Table 10-149. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 1.....	311
Table 10-150. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2	312
Table 10-151. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 2	312
Table 10-152. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 2.....	312
Table 10-153. Alarm System (Alarm List – Alarm Tile) by Operator (Interaction) Effect in Scenario 2	312
Table 10-154. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3	313
Table 10-155. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 3	313
Table 10-156. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 3.....	313
Table 10-157. Power and Effect Size of 2 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Duration)	314
Table 10-158. Main Results of Duration Data of Alarm Displays	314

Table 10-159. Main Results of Duration Data of Alarm Displays for 33 Periods of Scenario 1	315
Table 10-160. Main Results of Duration Data of Alarm Displays for 30 Periods of Scenario 2.....	316
Table 10-161. Main Results of Duration Data of Alarm Displays for 31 Periods of Scenario 3.....	317
Table 10-162. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1	319
Table 10-163. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 1.....	319
Table 10-164. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 1	319
Table 10-165. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2	320
Table 10-166. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 2.....	320
Table 10-167. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 2	320
Table 10-168. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3	321
Table 10-169. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 3.....	321
Table 10-170. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 3	322
Table 10-171. Power and Effect Size of 5 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Frequency)	323
Table 10-172. Summary of ANOVA Analyses of 5 Alarm AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Frequency)	323
Table 10-173. Main Results of Frequency Data for 33 Periods of Scenario 1 in Five AOIs	324
Table 10-174. Main Results of Frequency Data for 30 Periods of Scenario 2 in Five AOIs	326
Table 10-175. Main results of frequency data for 31 periods of scenario 3 in five AOIs.....	328
Table 10-176. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1	330
Table 10-177. AOI (Duration): Marginal Means and SD of 5 Alarm AOIs in Scenario 1	330
Table 10-178. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 1	330
Table 10-179. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2	331
Table 10-180. AOI (Duration): Marginal Means and SD of 5 Alarm AOIs in Scenario 2	331
Table 10-181. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 2	331
Table 10-182. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3	332
Table 10-183. AOI (Duration): Marginal Means and SD of 5 Alarm AOIs in Scenario 3	332
Table 10-184. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario	332
Table 10-185. Five Alarm AOIs by Operator (Interaction) Effect in Scenario 3.....	333
Table 10-186. Power and Effect Size of 5 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Duration)	333
Table 10-187. Summary of ANOVA Analyses of 5 Alarm AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Duration)	334
Table 10-188. Main Results of Duration Data in Five AOIs for 33 Periods of Scenario 1.....	335
Table 10-189. Main Results of Duration Data in Five AOIs for 30 Periods of Scenario 2.....	337
Table 10-190. Main Results of Duration Data in Five AOIs for 31 Periods of Scenario 3.....	338
Table 10-191. Descriptive Statistics of Operator Experience.....	341
Table 10-192. Descriptive Statistics for Frequency Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios.....	341
Table 10-193. Descriptive Statistics of the Reactor Operators for Frequency Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios	342
Table 10-194. Descriptive Statistics of the Turbine Operators for Frequency Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios	342
Table 10-195. Descriptive Statistics for Duration Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios	343
Table 10-196. Descriptive Statistics of the Reactor Operators for Duration Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios.....	343
Table 10-197. Descriptive Statistics of the Turbine Operators for Duration Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios.....	344
Table 10-198. Operator Experience: Marginal Means and SD across Three Scenarios	345
Table 10-199. AOI (Frequency): Marginal Means and SD across Three Scenarios	345

Table 10-200. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience across Three Scenarios	345
Table 10-201. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data across Three Scenarios	346
Table 10-202. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs across Three Scenarios	346
Table 10-203. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 1.....	346
Table 10-204. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 1.....	346
Table 10-205. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 1.	347
Table 10-206. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data in Scenario 1.....	347
Table 10-207. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs in Scenario 1.....	348
Table 10-208. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 2.....	348
Table 10-209. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 2.....	348
Table 10-210. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 2.	348
Table 10-211. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data in Scenario 2.....	348
Table 10-212. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs in Scenario 2.....	349
Table 10-213. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 3.....	349
Table 10-214. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 3.....	349
Table 10-215. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 3.	349
Table 10-216. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data in Scenario 3.....	350
Table 10-217. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs in Scenario 3.....	350
Table 10-218. Operator Experience: Marginal Means and SD across Three Scenarios	351
Table 10-219. AOI (Duration): Marginal Means and SD across Three Scenarios	351
Table 10-220. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience across Three Scenarios	351
Table 10-221. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data across Three Scenarios	351
Table 10-222. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs across Three Scenarios	352
Table 10-223. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 1.....	352
Table 10-224. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 1	352
Table 10-225. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 1.	352
Table 10-226. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data in Scenario 1.....	353
Table 10-227. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs in Scenario 1.....	353
Table 10-228. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 2.....	353
Table 10-229. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 2.....	353
Table 10-230. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 2.	354

Table 10-231. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data in Scenario 2.....	354
Table 10-232. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs in Scenario 2.....	355
Table 10-233. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 3.....	355
Table 10-234. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 3.....	355
Table 10-235. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 3.....	355
Table 10-236. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data in Scenario 3.....	355
Table 10-237. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs in Scenario 3.....	356
Table 10-238. Main Results of Frequency and Duration Data of Alarm Text versus Alarm Tag, and Operator Experience.....	356
Table 10-239. Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 1 in Three Scenarios	359
Table 10-240. Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 2 in Three Scenarios	360
Table 10-241. Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 3 in Three Scenarios	360
Table 10-242. Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 4 in Three Scenarios	361
Table 10-243. Summary of Acknowledgment, Compress, and Silence Actions of Crew 5 in Three Scenarios	361
Table 10-244. Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 6 in Three Scenarios	362
Table 10-245. Pearson Correlations between Alarm Handling Actions Data across Scenarios	362
Table 10-246. Partial Pearson Correlations between Alarm Handling Actions across Scenarios.....	362
Table 10-247. Pearson Correlations between Alarm Handling Actions' Data across Scenarios by Operator Role.....	362
Table 10-248. Partial Pearson Correlations between Alarm Handling Actions' Data across Scenarios	363
Table 10-249. Significant Results of ANOVA Analyses for Alarm Handling Actions.....	363
Table 10-250. Descriptive Statistics of Individual and Global Alarm Handling Actions	365

Índice de figuras

Figura 1-1. Sala de Control de C. N. de Vandellós, Tarragona (Endesa, n.d.).	7
Figura 1-2. Simulador de la sala de control de C. N. de Cofrentes (Foro Nuclear, n.d.).	15
Figura 1-3. Laboratorio HAMMLAB 2009 del Proyecto Halden.	17
Figura 2-1. Respuesta del operador a una situación anómala (EEMUA, 1999).....	30
Figura 3-1. Usos de la información de alarma (Niwa y Hollnagel, 2001).....	62
Figura 4-1. Sala de control de C. N. de Almaraz (Foro Nuclear, n.d.).....	76
Figura 7-1. Secuencia operacional preferida del sistema anunciador del NUREG-0700 (NRC, 1981).	135
Figura 7-2. Secuencia de operación de un sistema de alarma y anunciador (Kinkade y Anderson, 1984).	136

Figura 8-1. Modelo AIA de Stanton (Stanton, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998).....	156
Figura 9-1. Disposición del laboratorio indicando las máquinas conectadas a cada monitor (Miberg, 1998a).....	179
Figura 9-2. Disposición de las áreas de interés en el teclado sensible al tacto en el estudio principal.	184
Figura 9-3. Disposición de HAMMLAB en el experimento de automatización.	198
Figura 9-4. Disposición de información en el puesto del operador de reactor.....	199
Figura 9-5. Disposición de información en el puesto del operador de turbina.....	199
Figura 9-6. Display de visión general de gran tamaño del primario y CFMS.	200
Figura 9-7. Display de visión general de gran tamaño del secundario (y parcial del primario).....	200
Figura 9-8. Alarmas del primario en ventanillas.	202
Figura 9-9. Alarmas del secundario en ventanillas.....	202
Figura 9-10. Lista de alarmas del primario.	205
Figura 9-11. Lista de alarmas del secundario.	205
Figura 9-12. Botones del teclado: silenciar, comprimir y reconocer las alarmas.....	205
Figura 9-13. Tendencias del primario.	207
Figura 9-14. Tendencias del secundario.	207
Figura 9-15. Visión general de automatización.	208
Figura 9-16. Formato de ALDIV.....	208
Figura 9-17. Menú de selección de curvas de tendencias.....	208
Figura 9-18. Formato YP00 del primario.	209
Figura 9-19. Formato RL00 del secundario.	209
Figura 9-20. Disposición general del display NORS.	209
Figura 9-21. Formato del teclado en las pantallas de NORS.	210
Figura 9-22. Formato del campo entrada y salida de datos en NORS.	210
Figura 9-23. Formato YZ60 del sistema de protección de planta.....	211
Figura 9-24. Galería de experimentadores.....	213
Figura 9-25. Equipo de seguimiento de movimientos oculares.	215
Figura 9-26. Estación de Puntuación EyeCon.	215
Figura 9-27. Teclas de función de acceso directo del teclado sensible al tacto.	216
Figure 10-1. Average percentage of frequency data of four AOIs of alarm list and alarm tile.....	224
Figure 10-2. Average percentage of duration data of four AOIs of alarm list and alarm tile.	224
Figure 10-3. Mean of twelve AOIs frequency data of reactor operators in scenario 1.	225
Figure 10-4. Mean of twelve AOIs frequency data of turbine operators in scenario 1.	226
Figure 10-5. Mean of twelve AOIs frequency data of reactor operators in scenario 2.	226
Figure 10-6. Mean of twelve AOIs frequency data of turbine operators in scenario 2.	227
Figure 10-7. Mean of twelve AOIs frequency data of reactor operators in scenario 3.	227
Figure 10-8. Mean of twelve AOIs frequency data of turbine operators in scenario 3.	228
Figure 10-9. Mean of twelve AOIs duration data of reactor operators in scenario 1.....	228
Figure 10-10. Mean of twelve AOIS duration data of turbine operators in scenario 1.	229
Figure 10-11. Mean of twelve AOIs duration data of reactor operators in scenario 2.....	229
Figure 10-12. Mean of twelve AOIs duration data of turbine operators in scenario 2.....	230
Figure 10-13. Mean of twelve AOIs duration data of reactor operators in scenario 3.....	230
Figure 10-14. Mean of twelve AOIs duration data of turbine operators in scenario 3.....	231
Figure 10-15. Average of means of twelve AOIs frequency data of crews in all scenarios.....	231

Figure 10-16. Average of means of twelve AOIs duration data of crews in all scenarios.	232
Figure 10-17. Average number of visual accesses of reactor operators in four information sources..	233
Figure 10-18. Average number of visual accesses of turbine operators in four information sources..	233
Figure 10-19. Average proportion of time of reactor operators in four information sources.	233
Figure 10-20. Average proportion of time of turbine operators in four information sources.	233
Figure 10-21. Proportion of visual activity of reactor operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 1.	234
Figure 10-22. Proportion of visual activity of turbine operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 1.	234
Figure 10-23. Proportion of visual activity of reactor operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 2.	234
Figure 10-24. Proportion of visual activity of turbine operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 2.	234
Figure 10-25. Proportion of visual activity of reactor operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 3.	235
Figure 10-26. Proportion of visual activity of turbine operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 3.	235
Figure 10-27. NORS format YP00: HSI of valves YP11S001 and YP11S003.	269
Figure 10-28. NORS format SD50: HSI of valves RC51S003 and RC51S001.	269
Figure 10-29. NORS format RC95: HSI of valve RC51S003.	270
Figure 10-30. Transient detection: number of times that crews use alarm lists, alarm tiles, and other screens.....	271
Figure 10-31. Use of alarm lists, alarm tiles, and other screens for detecting disturbances.....	272
Figure 10-32. Distribution of Duration Data of Alarm System along Scenario 1.	274
Figure 10-33. Distribution of duration data of reactor operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 1.	275
Figure 10-34. Distribution of duration data of turbine operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 1.	275
Figure 10-35. Distribution of duration data of alarm system along scenario 2.	276
Figure 10-36. Distribution of duration data of reactor operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 2.	276
Figure 10-37. Distribution of duration data of turbine operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 2.	276
Figure 10-38. Distribution of duration data of alarm system along scenario 3.	277
Figure 10-39. Distribution of duration data of reactor operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 3.	278
Figure 10-40. Distribution of duration data of turbine operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 3.	278
Figure 10-41. Quadratic effect in frequency and duration of alarm data in scenario 1.	279
Figure 10-42. Quadratic effect in frequency and duration of alarm data in scenario 2.	279
Figure 10-43. Quadratic effect in frequency and duration of alarm data in scenario 3.	279
Figure 10-44. Means of frequency of alarm system by operator role by scenario.	282
Figure 10-45. Means of frequency of alarm tile by operator role by scenario.	283
Figure 10-46. Means of frequency of alarm list by operator role by scenario.	285
Figure 10-47. Means of Frequency of Alarm Tag by Operator Role by Scenario.	286
Figure 10-48. Means of frequency of alarm text by operator role by scenario.	287

Figure 10-49. Means of frequency of alarm value by operator role by scenario.....	288
Figure 10-50. Means of frequency of time and other parts of alarm list by operator role by scenario.	290
Figure 10-51. Means of duration of alarm system by operator role by scenario.	292
Figure 10-52. Means of duration of alarm tile by operator role by scenario.	293
Figure 10-53. Means of duration of alarm list by operator role by scenario.	294
Figure 10-54. Means of duration of alarm tag by operator role by scenario.	295
Figure 10-55. Means of duration of alarm text by operator role by scenario.	296
Figure 10-56. Means of duration of alarm value by operator role by scenario.	297
Figure 10-57. Means of duration of time and other parts of alarm list by operator role by scenario. .	298
Figure 10-58. Frequency data of alarm system, alarm list and alarm tile by crew in three scenarios.	301
Figure 10-59. Frequency data of alarm system, alarm list and alarm tile by operator role in three scenarios.	301
Figure 10-60. Duration data of alarm system, alarm list and alarm tile in three scenarios.	303
Figure 10-61. Duration data of alarm system, alarm list and alarm tile by operator role.....	303
Figure 10-62. Means of frequency of alarm system displays by operator role in scenario 1.	304
Figure 10-63. Means of frequency of alarm system displays by operator role in scenario 2.	305
Figure 10-64. Means of frequency of alarm system displays by operator role in scenario 3.	306
Figure 10-65. Means of duration of alarm system displays by operator role in scenario 1.	311
Figure 10-66. Means of duration of alarm system displays by operator role in scenario 2.	313
Figure 10-67. Means of duration of alarm system displays by operator role in scenario 3.	314
Figure 10-68. Means of frequency of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 1.	320
Figure 10-69. Means of frequency of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 2.	321
Figure 10-70. Means of frequency of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 3.	322
Figure 10-71. Means of duration of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 1.	330
Figure 10-72. Means of duration of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 2.	332
Figure 10-73. Means of duration of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 3.	333
Figure 10-74. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience across three scenarios.	346
Figure 10-75. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience in scenario 1.	347
Figure 10-76. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience in scenario 2.	349
Figure 10-77. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience in scenario 3.	350
Figure 10-78. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience across three scenarios. .	352
Figure 10-79. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience in scenario 1.	353
Figure 10-80. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience in scenario 2.	354
Figure 10-81. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience in scenario 3.	356
Figure 10-82. Alarm handling actions in scenarios.	358
Figure 10-83. Acknowledgment actions: global versus primary or secondary.	365
Figure 10-84 Compress actions: global versus primary or secondary.	365

Apéndices

Appendix A. Guías y directrices sobre salas de control y sistemas de alarmas en la industria nuclear

Appendix B. Directrices de salas de control y sistemas de alarma en la industria de procesos

Appendix C. Descriptive statistics of duration and frequency data of 30 AOIs and 12 AOIs

Appendix D. Selected process formats by the crews

Appendix E. Normality Tests

Appendix F. Timeline description and main crew actions in the scenarios

Appendix G. ANOVA analyses of frequency and duration of alarm system displays (alarm list versus alarm tile) in scenario periods

Appendix H. ANOVA analyses of frequency and duration of five alarm areas of interest in scenario periods

Appendix I. Alarm handling actions for every crew in three scenarios

Appendix J. ANOVA analyses of alarm handling actions

Acronyms

ABWR	<i>Advanced Boiling Water Reactor</i> (Reactor avanzado de agua en ebullición)
ACK	<i>Acknowledgement</i>
ADIOS	<i>Alarm and Diagnosis Integrated Operator Support</i>
AECB	<i>Atomic Energy Control Board</i>
AECL	<i>Atomic Energy of Canada Limited</i>
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AGA	<i>American Gas Association</i>
AGR	<i>Gas Cooled Reactor</i>
AIA	<i>Alarm Initiated Activities</i>
ALDIV	<i>Automatics Logic Diagram Interpreter and Visualiser</i>
ANOVA	<i>ANalysis Of VAriance</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AOI	<i>Area Of Interest</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
APS	Análisis Probabilista de Seguridad
ARP	<i>Alarm Response Procedure</i> (Procedimientos de respuesta a la alarma)
ASM	<i>Abnormal Situation Management</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i> (Control del Tráfico Aéreo)
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
AX10/50	<i>Electrical system</i>
BNFL	<i>British Nuclear Fuels</i>
BOE	Boletín Oficial del Estado
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CAMLS	<i>CANDU Annunciation Message List System</i>
CANDU	<i>CANada Deuterium Uranium</i>
CASH	<i>Computerized Alarm System for HAMMLAB</i>
CEN	Comité Europeo de Normalización
CENELEC	Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica
CFMS	<i>Critical Function Monitoring System</i>
CFR	<i>Code of Federal Regulations</i>
CIAIAC	<i>Civil Aviation Accident and Incident Investigation Commission</i>
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CMEA	<i>Council for Mutual Economic Aid</i>
CNSC	<i>Canadian Nuclear Safety Commission</i>
COAST	<i>Computerised Alarm System Toolbox</i>
COM	<i>Compress</i>
COSS	<i>Computerised Operator Support System</i> (Sistema de apoyo a la operación computarizado)
CREAM	<i>Cognitive Reliability and Error Analysis Method</i>
CRM	<i>Crew Resource Management</i>
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i>
CSB	<i>U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board</i>
CSCW	<i>Computer-Supported Cooperative Work</i>
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear

CSNI NEA	<i>Committee on Safety of Nuclear Installations Nuclear Energy Agency</i>
DAS	<i>Disturbance Analysis System (Sistema de análisis de anomalías)</i>
DCS	<i>Distributed Control System (Sistema de control distribuido)</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
EdF	<i>Electricité de France</i>
EEMUA	<i>The Engineering Equipment and Materials Users Association</i>
EFD	<i>Early Fault Detection</i>
EFTA	<i>European Free Trade Association</i>
EMT	<i>Eye Movement Tracking</i>
EPR	<i>European Pressurized Reactor</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ETSI	<i>Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FRAM	<i>Functional Resonance Accident Model</i>
GE	<i>General Electric</i>
GEMS	<i>Generic Error Modelling System</i>
GS	<i>Guías de Seguridad</i>
HALO	<i>Handling Alarms using LOGic</i>
HAMBO	<i>HAMMLAB Boiling Water Reactor Alarm System</i>
HAMMLAB	<i>Halden Man-Machine LABORatory</i>
HBWR	<i>Halden Boiling Water Reactor</i>
HFE PRM	<i>Human Factors Engineering Program Review Model</i>
HFE	<i>Human Factors Engineering</i>
HRA	<i>Human Reliability Analysis (Análisis de Fiabilidad Humana)</i>
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
HSI	<i>Human-System Interface (Interfaz Persona-Sistema)</i>
HWR	<i>Halden Work Report</i>
I&C	<i>Instrumentación y Control</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IEA	<i>International Ergonomics Association</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFE	<i>Institutt for Energiteknikk</i>
INES	<i>International Nuclear and Radiological Event Scale</i>
INPO	<i>Institute of Nuclear Power Operations</i>
INSHT	<i>Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo</i>
IS	<i>Instrucciones del Consejo</i>
ISA	<i>The Instrumentation, Systems, and Automation Society</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	<i>Instrucciones Técnicas</i>
ITC	<i>Instrucciones Técnicas Complementarias</i>
ITF	<i>Integrated Test Facility</i>
IVO	<i>Nokia Electronics e Imatran Voima Oy</i>
KWU	<i>KraftWerk Union</i>

LABIHS	<i>Human System Interface Laboratory</i>
LOCA	<i>Loss-Of-Coolant Accident</i>
MAIB	<i>Marine Accident Investigation Branch</i>
MTO	<i>Man Technology Organization</i>
NAMUR	<i>International User Association of Automation Technology in Process Industries</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NORS	<i>NOKia Research Simulator</i>
NPD	<i>Norwegian Petroleum Directorate</i>
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>
NPPAP	<i>Nuclear Power Plant Alarm Prioritization</i>
OCDE	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
OGP	<i>International Association of Oil and Gas Producers</i>
OIEA	<i>Organismo Internacional de Energía Atómica</i>
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
P&ID	<i>Process and Instrumentation Diagram</i>
PAS	<i>Plant Automation Services</i>
POE	<i>Procedimiento de operación de emergencia</i>
PSS	<i>PlantState Suite</i>
PVD	<i>Pantalla de Visualización de Datos</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> (reactor de agua a presión)
R&D	<i>Research and Development</i>
RC90/95	<i>Turbine bypass system</i>
RD10/50	<i>High pressure preheaters system</i>
RH10/50	<i>Low pressure turbine steam extraction and low pressure preheaters systems</i>
RL00	<i>Feedwater transfer system</i>
RLRF	<i>Feedwater pumps auxiliary system</i>
RM10/50	<i>Main condensate transfer system</i>
RO	<i>Reactor Operator</i>
RQ00	<i>Auxiliary steam system</i>
RQC0	<i>Auxiliary steam control</i>
RV00	<i>Deionate (demineralized water) supply system</i>
SA10/50	<i>Turbine system</i>
SACRI	<i>Situation Awareness Control Room Inventory</i>
SART	<i>Silence, Acknowledge, Reset, Test</i>
SB10/50	<i>Turbine lubrication and bearings</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SD	<i>Standard Deviation</i>
SD10/50	<i>Condensate system and ejectors</i>
SDCV	<i>Spatially Dedicated, Continuously Visible</i> (Espacialmente dedicados y continuamente visibles)
SE	<i>Standard Error</i>
SE10/50	<i>Turbine control</i>
SEGHOF	<i>Special Expert Group on Human and Organisational Factors</i>
SIL	<i>Silence</i>
SIS	<i>Sistema Instrumentado de Seguridad</i>
SK00	<i>Main plant control</i>

SMART	<i>System-Integrated Modular Advanced Reactor</i>
SMS	<i>Safety Management System</i>
SNGV	<i>Sistema Nuclear de Generación de Vapor</i>
SP10/50	<i>Generator system</i>
SPDS	<i>Safety Parameter Display System</i>
SPMS	<i>Success Path Monitoring System</i>
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
SRK	<i>Skill, Rule and Knowledge</i>
SRP	<i>Standard Review Plan</i>
STAMP	<i>Systems-Theoretic Accident Model and Processes</i>
TB00	<i>Boron system</i>
TC00	<i>Coolant purification system</i>
TE00	<i>Pre-purification of coolant drainage system</i>
TF00	<i>Nuclear intermediate cooling system</i>
TH	<i>Emergency core cooling system</i>
THJQ	<i>Emergency core cooling system and sprinkler</i>
TJ	<i>Emergency make up system</i>
TK	<i>Normal make up system</i>
TKTB	<i>Make-up water and boron supply systems</i>
TKTE	<i>Prepurification and make-up water system</i>
TMI-2	<i>Three Mile Island Unit 2</i>
TO	<i>Turbine Operator</i>
TOWS	<i>Take-Off Warning System</i>
TQ	<i>Spray system</i>
U.S. NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>
UCM	<i>Universidad Complutense de Madrid</i>
UMMI	<i>Unified Man-Machine Interface</i>
V&V	<i>Verification and Validation</i>
VCVA	<i>Seawater system</i>
VDU	<i>Visual Display Unit</i>
VF00	<i>Service water system</i>
VVER	<i>Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor</i>
WAN	<i>World Nuclear Association</i>
XX00	<i>Containment isolation</i>
YA00	<i>Primary circuit</i>
YB00	<i>Steam generators</i>
YD00	<i>Reactor coolant pumps and injection water system</i>
YP00	<i>Pressurizer system</i>
YP90_1/_4	<i>Pressure control</i>
YR00	<i>Reactor control</i>
YS00	<i>Control rods</i>
YX00	<i>Reactor instrumentation</i>
YZ00/60	<i>Reactor and plant protection</i>

RESUMEN

La investigación ha explorado el rol y el uso del sistema de alarma en una sala de control avanzada, en el dominio del control de procesos. El sistema de alarma ayuda al operador a mantener las variables dentro del rango de operación normal y en los márgenes de seguridad de la planta. Las alarmas constituyen un elemento vital en el control del proceso.

En la parte teórica del proyecto de investigación, inicialmente se caracteriza lo que constituye una sala de control y un simulador de control del proceso, las diversas aproximaciones al diseño, convencional frente a avanzado, aspectos relativos a la introducción de nuevas tecnologías en la sala de control y la importancia del concepto de operación de la planta. En segundo lugar, se abarca el papel del operador en la sala de control, las funciones y las tareas que lleva a cabo en los distintos estados de la planta y condiciones de operación, terminando con una descripción de las capacidades y limitaciones del ser humano relevantes para un enfoque de diseño centrado en el usuario.

El siguiente capítulo resume la revisión del estado del arte sobre sistemas de alarmas, cubre la filosofía básica de un sistema de alarma, el concepto de alarma y de sistema de alarma, las funciones y los usos de las alarmas en la sala de control. Continúa con el enfoque normativo de la incorporación de los principios de los factores humanos en el diseño de la sala de control y en el sistema de alarma, así como una descripción de los principios, las directrices y las recomendaciones, las normas y las guías de estilo.

Los principales problemas del diseño del sistema de alarmas, que los operadores y las organizaciones necesitan afrontar en la industria nuclear y en otros entornos, se exponen para, a continuación, presentar una serie de incidentes y accidentes de diferentes dominios, en donde las alarmas desempeñaron un papel relevante.

El siguiente capítulo describe las principales características del sistema de alarma, en especial el medio de presentación de las alarmas en una sala de control convencional frente a una sala de control avanzada.

El último capítulo de la parte teórica revisa el estado del arte de la literatura sobre estudios de sistemas de alarmas en relación con las hipótesis y las preguntas de investigación del proyecto de I+D. Las bases para la formulación de trece hipótesis están en estudios previos descritos en la revisión del estado del arte así como en nuestra experiencia en el diseño y la evaluación de la interfaz de sistemas de alarma en simuladores de salas de control del ámbito nuclear. El tema principal de la investigación es la presentación de información de alarma y la forma en qué los operadores utilizan el sistema de alarma en la sala de control.

En la parte experimental, se describe inicialmente el método experimental empleado en el desarrollo de la tesis. Se analiza la actividad visual de los equipos de operación, empleando diseños experimentales intra-sujetos y entre-sujetos y diferentes escenarios. Las fuentes de recogida de información incluyen datos de registros oculares (seguimiento de movimientos oculares), registros del simulador, vídeos y registros de comentarios de expertos en el proceso realizados en tiempo real durante la simulación.

Participaron seis equipos de operadores profesionales (dieciocho operadores con licencia) de una central nuclear en operación, cada turno estaba compuesto por el operador de reactor, el operador

de turbina y el supervisor de turno. Los operadores de reactor y de turbina utilizan el equipo de seguimiento de movimientos oculares. Por consiguiente, en los datos del equipo se han promediado las puntuaciones de los puestos del operador de reactor y de turbina, no incluyendo el papel del supervisor ni de otros posibles miembros del turno de operación.

Tres escenarios de tipo diagnóstico, en donde las condiciones de la planta se deterioran gradualmente y el operador tiene que entender la anomalía antes de tomar las necesarias medidas correctivas, se llevaron a cabo en un simulador avanzado de alcance total tipo PWR del Laboratorio HAMMLAB (*Halden Man-Machine LABoratory*) en Noruega. Los escenarios difieren en el nivel de complejidad y en el tipo de automatización. El primer escenario fue un disparo erróneo del reactor, el segundo escenario consistió en el disparo de una turbina y una fuga de vapor, y el tercer escenario era un enfriamiento no intencionado y una fuga en el colector de las bombas del agua de alimentación. Cada escenario se compone de varios fallos independientes, con una duración de alrededor de cuarenta y cinco minutos. Todos los transitorios se implementan en un momento temporal determinado del escenario para todos los equipos, con independencia de las acciones del operador, con la excepción de una anomalía.

Cada operador dispone de ocho pantallas de visualización en su estación de trabajo. Los cuatro monitores de la fila superior incluyen las dos pantallas del sistema de alarmas CASH, que consta de una pantalla de alarmas en ventanillas y una pantalla de lista de alarmas ordenada cronológicamente. Las alarmas del sistema de alarma se ajustan a la posición del operador en el equipo: alarmas del lado primario (utilizado por el operador de reactor) y del lado secundario (para el operador de turbina). Las alarmas están también integradas en los formatos del proceso (ubicados en la fila inferior).

La pantalla de alarmas en ventanillas se compone de alarmas importantes, presentadas en ventanas anunciadoras en una posición dedicada y fija, con aproximadamente 250 alarmas clave. La pantalla de lista de alarmas presenta listas cronológicas de mensajes de alarma. La lista de alarmas muestra el mensaje de alarma, que contiene la siguiente información: anunciador visual, el tiempo de activación de la alarma, la etiqueta identificadora de la alarma, la descripción del mensaje de alarma o texto de alarma incluyendo la severidad de la alarma, el valor actual, el límite de la alarma y la unidad de medida. La prioridad de la alarma se indica mediante un código de color.

Dos equipos de seguimiento ocular del modelo ASL 4000 SU, ligeramente modificados, proporcionaron medidas de tiempo real del punto de visión a 50Hz. Se acopló una cámara a color a un casco que llevaron los operadores, proporcionando la situación vista por el participante. Se registró la actividad visual de los operadores empleando el sistema EyeCon y la grabación en vídeo obtenida con el equipo de seguimiento de movimientos oculares. La línea de visión se muestra en forma de una cruz superpuesta que se desplaza en función del punto de fijación del operador. Se registra cuando la cruz entra y sale de una determinada área de interés (AOI), empleando la estación de puntuación EyeCon en las instalaciones del Proyecto Halden en Noruega.

Se definieron áreas de interés que permitieran cubrir toda la interfaz de la sala de control. El estudio cubrió un total de 30 AOI, que a su vez se agrupan en 12 AOI o fuentes de información, que incluye, entre otras AOI, la pantalla de visión general de gran tamaño, las curvas de tendencia, los formatos del proceso, las alarmas en ventanilla, la lista de alarmas, los procedimientos y sistemas de apoyo a la operación avanzados.

Del total de 30 AOI de la interfaz, definimos cinco AOI en relación con las alarmas. Mientras que la pantalla de alarmas en ventanilla constituye una única AOI, en cambio la lista de alarmas está compuesta por cuatro AOI, que son el código identificador de la alarma, el texto de la alarma, el valor de la alarma y el tiempo de ocurrencia y otras partes de la lista de alarma.

Se estimó la duración de la fijación y el número de fijaciones en las AOI de la interfaz. Puesto que el interés principal de la investigación está en el papel del sistema de alarma en la sala de control, el análisis de la actividad visual del operador en las pantallas de alarma fue calculado durante el tiempo total del escenario (aproximadamente 45 minutos). Intencionalmente, se incluyen períodos correspondientes a etapas de monitorización, puesto que los operadores pueden utilizar de forma activa el sistema de alarma para controlar la planta durante operación normal. En cambio, se establecieron criterios de selección de períodos en cada escenario, definidos conforme a la implantación de las principales anomalías en cada escenario, para llevar a cabo el análisis de la actividad visual del operador en todas las AOI de la interfaz (30 AOI, agrupadas posteriormente en 12 AOI).

Formulamos y analizamos, en el proyecto, un total de trece hipótesis o preguntas de investigación. La primera hipótesis explora el porcentaje de tiempo empleado monitorizando las AOI de alarma. La segunda hipótesis se refiere al tiempo de detección de los equipos de operación. La tercera hipótesis considera el diagnóstico de las anomalías. La cuarta hipótesis se refiere a la fuente de información de la interfaz que los operadores utilizan para la detección de las anomalías. La quinta hipótesis explora las funciones del sistema de alarma. La sexta hipótesis analiza si hay una tendencia cuadrática ante la aparición de anomalías, durante la fase de detección. Las hipótesis séptima y octava investigan si hay una distribución homogénea de los datos de frecuencia y de duración en todas las AOI de alarma, considerando los tres escenarios y todos los equipos de operación. Las hipótesis novena y décima se refieren al número de accesos visuales y al tiempo de permanencia de los operadores en las dos pantallas de alarma: lista de alarmas frente a alarmas en ventanillas. La undécima hipótesis considera dos AOI de la lista de alarmas: la descripción textual de la alarma y el código identificador de la alarma, y la manera en que la experiencia en operación de los miembros del turno modula el uso de estas AOI. Las hipótesis duodécima y décima tercera se ocupan de las acciones de tratamiento de las alarmas llevadas a cabo por los operadores: la cantidad de acciones de tratamiento de alarma (silenciar, reconocer y comprimir), así como la opción individual y global (simultáneamente en las pantallas de alarma de ambos operadores) para comprimir y reconocer las alarmas.

Los hallazgos revelan la existencia de cuatro fuentes principales de información empleadas por los equipos de operación durante los períodos seleccionados de cada escenario: los formatos del proceso, la pantalla de visión general de gran tamaño, las tendencias y el sistema de alarma. En los períodos seleccionados del escenario en el experimento (el tiempo total de los datos de registro ocular en las 30 AOI y 12 AOI es de 990 minutos), la distribución de la actividad visual en estas cuatro fuentes de información representa el 85,82% de los accesos visuales de los turnos y el 90,84% del tiempo empleado por los equipos. El porcentaje medio de tiempo asignado estuvo alrededor del 48% a los formatos del proceso NORS, 20% a la pantalla de visión general de gran tamaño, 12% a las tendencias y 11% a las alarmas.

En un simulador de una sala de control avanzada, los resultados indican que los equipos de operación emplean el sistema de alarma alrededor del 10% del tiempo total disponible, promedio de

tres escenarios, variando los escenarios de un mínimo de 9,25 % a un máximo de 11,08%, en situaciones anómalas. En el experimento, el tiempo total de los datos de registro ocular en todas las AOI del sistema de alarma ha sido de 1620 minutos. Puesto que las alarmas están también presentes en otros elementos de la interfaz de la sala de control, este porcentaje podría ser ligeramente superior. Es importante mencionar una mayor duración de las fijaciones en el sistema de alarma de los operadores de reactor que de los operadores de turbina (12,82% frente a 7,21%).

El tiempo de detección del transitorio fue menor cuando se anunciaba la anomalía con un mensaje de alarma, todos los equipos de operación detectaron dichos transitorios. Sin embargo, los operadores también detectaron inmediatamente algunas anomalías que no disponían de alarma, debido a que el operador estaba observando el formato del proceso en el momento en que se produce el cambio de estado del componente. Además, los equipos realizaron con éxito la detección y el diagnóstico de trece anomalías principales, con la excepción de que hubo dos equipos que no detectaron una anomalía de las trece implementadas en el experimento. Una serie de posibles argumentos explicativos de las dificultades que los operadores experimentaron en la detección se proporciona en la discusión de los resultados.

Los datos de duración y frecuencia del sistema de alarma, lista de alarmas, alarmas en ventanilla, y las cuatro AOI de la lista de alarmas (el código identificador de la alarma, el texto de la alarma, el valor de la alarma y el tiempo de ocurrencia y otras partes de la lista de alarma) se distribuyeron de manera uniforme para todos los equipos a través de tres escenarios, con la excepción del área tiempo de ocurrencia y otras partes de la lista de alarmas.

Se describen los principales resultados sobre cómo emplean los operadores las pantallas del sistema de alarma: espacialmente dedicada y continuamente visible, presentación en paralelo, en ventanillas de alarmas frente a posición variable y presentación secuencial de la lista de mensajes de alarma ordenada cronológicamente. Hay que destacar que los equipos detectaron las anomalías empleando una diversidad de fuentes de información, que incluye listas de alarma, alarmas en ventanilla, formatos del proceso y la pantalla de visión general de gran tamaño. Resaltar que la lista de alarmas fue una fuente muy relevante, utilizada en numerosas ocasiones para la detección.

Los datos muestran, de forma estadísticamente significativa, que los operadores alcanzan puntuaciones más elevadas en el número de fijaciones y en la duración de las fijaciones en la lista de alarmas que en las alarmas presentadas en ventanillas. Destacar en este sentido que los operadores están acostumbrados a usar la lista de alarmas en la central de referencia (en cambio, la lista de alarmas no está disponible en algunas salas de control, ya que las alarmas se muestran solamente en paneles anunciadores) y que las alarmas en ventanillas incluían únicamente alarmas clave. Los hallazgos muestran también una alta correlación entre la mayoría de los datos de duración y de frecuencia de las AOI del sistema de alarma. Por otra parte, añadir que estudios previos no recomiendan la lista de alarmas como el único medio de presentación de las alarmas en la sala de control. Nuestros resultados también sugieren la complementariedad de ambas formas de presentación de información.

En la pantalla de lista de alarmas, al comparar el texto de alarma (la descripción del mensaje de alarma) y el código identificador de la alarma, los resultados indican, de forma estadísticamente significativa, que el área de interés con el mayor tiempo de permanencia y número de fijaciones es el

texto de alarma. Sin embargo, no encontramos efectos estadísticos entre la experiencia de los operadores y una mayor utilización del texto de alarma o del código identificador.

Considerando las cinco AOI del sistema de alarma, el promedio de accesos visuales y del tiempo monitorizando las AOI se distribuye del siguiente modo: texto de alarma (37% de frecuencia frente a 41% de duración), alarmas en ventanilla (25% de frecuencia frente a 26% de duración), código identificador de alarma (18% de frecuencia frente a 16% de duración), valor de la alarma (11% de frecuencia frente a 9% de duración) y tiempo y otras parte de la lista de alarma (9% de frecuencia frente a 8% de duración).

Los equipos observaron el sistema de alarma en los diferentes estados de operación del escenario, abarcando las fases de la monitorización, la detección, la toma de decisiones y la implementación de la respuesta. Por lo tanto, los operadores también supervisan el proceso por medio del sistema de alarma. Además, existieron tendencias cuadráticas (el incremento y la posterior disminución de la actividad visual en las alarmas) en períodos de los tres escenarios, en el número de accesos visuales y en la cantidad de tiempo empleado en el sistema de alarma, correspondiendo a la implementación de los transitorios en el proceso. No obstante, también existieron diferentes tipos de efectos principales en los períodos de los escenarios.

Durante el estudio, se observaron múltiples funciones del sistema de alarma, que no están asociadas a sucesos anómalos, cubriendo otras funciones además de alertar, como son la monitorización durante operación normal, para conocer el estado de la planta. Un hallazgo es, por tanto, que el sistema de alarma a menudo desempeña otro papel que el previsto o anticipado por los diseñadores.

El sistema de alarma se utilizó como una herramienta de retroalimentación de ciertas acciones del operador, para mantener el conocimiento del estado del proceso. Hemos detectado que los operadores no sólo responden a las alarmas, también anticipan algunas, observan las nuevas alarmas en las pantallas del sistema de alarma. El sistema de alarma se utilizó con un papel confirmatorio, en el sentido de que los operadores inicialmente detectan la anomalía en los formatos del proceso o en la pantalla de visión general de gran tamaño, y después realizan la búsqueda de información en el sistema de alarma. En ocasiones, los operadores buscan información de alarma consecutivamente en ambas pantallas de alarma. La doble comprobación de información permite verificar la información de alarma en una segunda fuente de información, validar la información existente.

En cuanto a la manera en que los operadores afrontan las alarmas, conocido habitualmente como acciones de tratamiento de las alarmas, hay una cantidad diferente de acciones de silenciar, comprimir y reconocer, pero sin un efecto estadísticamente significativo, en cambio la presentación de nuevas alarmas sí influye estadísticamente en las acciones llevadas a cabo por el operador. Además, existe una elevada correlación entre las acciones de silenciar y reconocer de los operadores de reactor, y entre silenciar y comprimir en el caso de los operadores de turbina.

En relación con las acciones de tratamiento de las alarmas, es sobre todo mediante acciones individuales de reconocer y comprimir, en lugar de la forma simultánea de todas las alarmas de ambos operadores. No obstante, los equipos de operación emplearon las dos formas de gestión de las alarmas.

Se proporcionan recomendaciones de diseño en base a los resultados, por ejemplo, en relación con la configuración del sistema de alarma, el contenido del mensaje de alarma y la forma de

interactuar en el tratamiento de las alarmas. Fue también proporcionada retroalimentación sobre aspectos específicos del diseño de la interfaz del simulador y del software EyeCon al finalizar el proceso de puntuación de los datos de registro ocular. Consideramos que los resultados y los datos de esta investigación se pueden emplear como base para las guías de diseño de factores humanos en el área de sistema de alarma.

Se proporcionan explicaciones alternativas de los resultados. Encontramos dos factores que requieren investigación adicional: la complejidad del diseño del escenario y el papel del operador. Cada escenario constaba de varias anomalías, con un número y tipo de fallos variable, que a veces daba lugar a enmascarar el fallo subsiguiente. Los operadores de reactor presentaron una mayor actividad visual en el sistema de alarma que los operadores de turbina.

Entre las contribuciones más importantes de los resultados de la investigación está que el análisis detallado de la actividad visual ha identificado aplicaciones polifacéticas de las alarmas en el control de procesos ante anomalías, entre ellas, alertar de anomalías en el proceso, monitorizar durante operación normal, actualizar el conocimiento del estado del proceso, proporcionar retroalimentación de determinadas acciones y confirmar datos de otras fuentes de información. El resultado es consistente con hallazgos previos de estudios de campo en la sala de control durante operación normal.

El estudio considera, a partir de un enfoque novedoso, la actividad visual detallada de la actuación del operador en situaciones de alarma. Los análisis implican un esfuerzo considerable en cuanto al tiempo requerido para llevar a cabo la investigación. Consideramos los resultados de utilidad para nuevos conceptos de diseño de sistemas de alarma en salas de control híbridas y avanzadas. Las implicaciones de este estudio persiguen contribuir principalmente a aspectos relacionadas con la seguridad.

Los resultados de la investigación del análisis de la actividad visual de los operadores llevan a la conclusión de que el sistema de alarma es un elemento vital en la sala de control, debido a la complejidad de las tareas para el control del proceso, y es la principal fuente para detectar fallos en la planta. Sin embargo, también sirve para una variedad de funciones (la filosofía del sistema de alarma), tanto en operación normal como accidental.

Exponemos las limitaciones existentes en el proyecto de investigación así como actividades para complementar los resultados del estudio, incorporando además posibles líneas futuras abiertas a investigación.

Extrayendo algunas conclusiones, nuestra contribución, un pequeño logro en el tema de las alarmas en el dominio del control de procesos, en nuestra opinión, es indispensable la realización de investigación en sistemas de alarma, un avance en el desarrollo de la filosofía del sistema de alarma, la incorporación de las necesidades y capacidades de los operadores, la contribución a un mejor diseño del sistema de alarma. La necesidad de investigación sobre las alarmas todavía resulta esencial.

SUMMARY

The research has been conducted to explore the role and the use of alarm system in an advanced control room in the process control domain. Alarm system supports the operator to maintain variables within normal operating range in the safety margins of the plant. The alarms are a vital element in the process control.

In the theoretical part of the research project, before starting with aspects related to the alarm system in the process control, initially we characterize the control room and the simulators in the process control, the approach to the different types of design (conventional versus advanced), issues of the introduction of new technologies in the control room and the relevance of the concept of operation of the plant. Second, the role of the operator in the control room is explained, the operator's functions and the tasks assigned to them based on the plant states during diverse operating conditions, and the capabilities and limitations of the human being relevant for a user-centred design approach.

A state-of-the-art review covers the basic philosophy of an alarm system in the control room, the concept of alarm and alarm system, the functions of the alarms, and the uses of the alarm systems. Next follows a review of the regulatory approach on the incorporation of human factors principles in the control room and in the alarm system design as well as a description of principles, guidelines and recommendations, standards and style guides.

Then, the primary problems with alarm system design, that operators and organizations need to handle, are reviewed for the nuclear industry and other environments. Next, some incidents and accidents that happened in different domains are described, highlighting the role of the alarms in the events.

The features of the alarm system, focus on the alarm presentation media in a conventional control room versus an advanced control room, are the subject of one of the chapters.

The last chapter of the theoretical part presents a literature review of the state of the art for alarm systems in relation to the hypotheses and the research questions of this research project. The bases for formulating of the thirteen hypotheses comes from previous studies described in the state-of-the-art review and from our experience in the design and evaluation of the interface of alarm systems in control room simulators of the nuclear field. The primary focus of the research is on the presentation of alarm information and how operators use the alarm system in the control room.

In the experimental part, initially the experimental method of the study is described. The visual activity of operating crews was analyzed with experimental design which comprises between designs and within designs in different scenarios. Several sources of information data collection were employed in the study, such as eye movement tracking equipment data, simulator logs, videotapes, and records of on line process expert' comments during the simulations.

Six professional crews of nuclear power plants in operation participated (eighteen licensed operators), and each crew was composed of reactor operator, turbine operator and shift supervisor. The reactor and turbine operators used the eye movement tracking equipment. Therefore, the crew data were averaged over the reactor and turbine operators, not including the role of supervisor or other potential members of the shift.

Three scenarios of diagnostic type, in where the plant conditions become gradually deteriorated and the operator needs to understand the disturbance before taking the required corrective actions, were performed in a full scope advanced PWR simulator of the Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB) in Norway. The scenarios differ on the level of complexity and the type of automation. The first scenario was a faulty reactor trip, the second scenario consisted on the trip of one turbine and a steam leakage, and the third scenario was a not intended cooling down and leakage in the pressure manifold of the feedwater pumps. Each scenario is composed of several independent failures, lasting around forty-five minutes. All the transients are implemented at the same time for all crews in the scenario, independently of the operator's actions, with one exception.

Each of the operators had eight VDU monitors available at their workstations. The four monitors in the upper row include the two screens of the alarm system CASH, which consists of an alarm tile display and a chronologically organized alarm list display. The alarm system presents a set of alarms dedicated to each operator position in the team, with alarms for primary side (used by reactor operator) and for secondary side (for turbine operator). The alarms are also integrated in the process formats (placed in the lower row).

The alarm tile display is composed of important alarms in form of tiles at fixed predefined display locations, with approximately 250 key alarms. The alarm list display presents alarms in form of chronological lists of alarm messages. The alarm list shows an alarm message which contains the following information: visual annunciator, time of occurrence of when the alarm became active, alarm identification tag, alarm message description or alarm text including the alarm severity, current value, alarm limit, and engineering unit. The alarm priority is indicated by color coding.

Two slightly modified ASL model 4000 SU eye-movement trackers provided real-time measurement of the point of gaze at 50Hz. A head-mounted scene camera captured the situation viewed by the participant. The EyeCon system and the eye-tracker scene camera video with the cross-hair (which shows the line of gaze) were used for scoring the operators' visual activity. Every time the cross-hair entered and leaved the area of interest (AOI) was scored using the EyeCon scoring station in the experimental facilities of the Halden Project in Norway.

The areas of interest were defined by covering all the AOIs which represent the HSI of the control room. The study covered a total of 30 AOIs, which in turn are grouped in 12 AOIs or sources of information, including, among other AOIs, the large screen overview, the trend curves, the process formats, the alarm tile, the alarm list, the procedures and computerized operation support systems.

Of the 30 AOIs of the interface, five AOIs concern the alarms. The alarm tile display represent one AOI, however the alarm list display comprises four AOIs which are the alarm tag, the alarm text, the alarm value, and time and other parts of the alarm list.

The fixation duration and fixation number on the AOIs of the interface were estimated. As the outstanding focus of the research was on the role of the alarm system in the control room, the analysis of the operator' visual activity on the alarm displays has been estimated for the total scenario time (45 minutes). Intentionally, there are included periods corresponding with monitoring stages, as operators may actively use the alarm system to monitor the plant during normal operation. However, criteria were established, according with the time of occurrence of the main malfunctions of each scenario, for selecting scenario periods for doing the complete analysis of the operator visual activity on the information available at the interface (30 AOIs, afterwards grouped in 12 AOIs).

A total of thirteen hypotheses, or research questions, are defined and analyzed in the project. The first hypothesis explores the percentage of time spent monitoring the alarm AOIs. The second hypothesis refers to the detection time of the crews. The third hypothesis considers the diagnosis of the disturbance. The fourth hypothesis deals with the information source of the interface which the operators use for detecting the disturbance. The fifth hypothesis explores the functions of the alarm system. The sixth hypothesis analyzes if there is a quadratic trend with the appearance of anomalies, during the detection phase. The seventh and eighth hypotheses investigate if there is a homogenous data distribution across the three scenarios by crews in all alarm AOIs (data of frequency and of duration). The ninth and tenth hypotheses refer to the number of visual accesses and the dwell time of the operators in the two alarm screens: alarm list versus alarm tile. The eleventh hypothesis considers two AOIs of the alarm list: the alarm textual description and the alarm identification code tag, and how the experience of the operators modulates the use of these AOIs. The twelfth and thirteenth hypotheses deal with the alarm handling actions of the operators: the amount of alarm treatment actions (silence, acknowledgment and compress) as well as the individual and global options (act simultaneously on the alarm displays of both operators) for acknowledging and compressing alarms.

The findings indicate that four main sources of information were used by the crews during the selected periods of the scenarios: the process formats, the large screen overview, the trends, and the alarm system. In the selected periods of the scenario in the experiment (the total time of eye movement data in 30 AOIs, and 12 AOIs, is 990 minutes), the allocated visual activity across these four information fields accounted for the 85.82% of the crews' visual accesses, and the 90.84% of the time spent by the crews. The average proportion of allocated time was around the 48% in the NORS process format, 20% in the large screen overview, 12% in the trends, and 11% in the alarms.

In a simulator of an advanced control room, the results indicate that operating crews spend in the alarm system around the 10% of the available scenario time, averaged over three scenarios with a minimum of 9.25% to a maximum of 11.08%, in abnormal situations. In the experiment, the total time of eye movement data of the alarm system AOIs was 1620 minutes. Since alarms are also present in other elements of the interface of the control room, this time could be slightly higher. It is important to mention that a longer fixation of the reactor operators was allocated to the alarm system in comparison to the turbine operators (i.e., 12.82% versus 7.21%).

The detection time of the disturbance was lower when an alarm message was presented, and all six crews detected the transients with an associated alarm message to the disturbance. However, operators also detected at once some of the disturbances even in the absence of an associated alarm, because their focus was on the process format display that showed the change of the state of the component. In addition, the crews successfully performed the detection and diagnosis of thirteen main disturbances, with the exception of two crews failing to detect one disturbance of the thirteen implemented in the experiment. Possible arguments to explain the difficulties that operators experienced on detecting are provided in the discussion of results.

The duration and frequency data of the alarm system, alarm list, alarm tile, and the four AOIs of the alarm list (the alarm tag, the alarm text, the alarm value, and time and other parts of the alarm list) were evenly distributed for all crews across three scenarios, with the exception of the AOI of time and other parts of the alarm list.

There are described the main results from operator utilization of the alarm system displays: spatially dedicated, continuously visible displays, parallel presentation method, the alarm tile versus variable physical location and sequential presentation of alarm messages on a chronological alarm list. It should be noted that the crews detected the disturbance by using a variety of information sources, which included alarm lists, alarm tiles, process formats, and the large screen overview. The alarm list was a highly relevant source used for detecting.

The operators reach higher scores, statistically significant, in the number of fixations and the fixation time of the alarm list than the alarm tile. It should be noted two issues, the first is that operators are accustomed to using alarm list in the reference plant (however, the alarm list is not available in some control rooms, and the alarms are only displayed in hardwired panels); the second is that the alarm tiles only show key alarms. The findings refer also a high correlation between most data of duration and frequency of the AOIs of the alarm system. Moreover, it should be highlight that, in previous work, the alarm list is not recommended as unique alarm presentation media in the control room. Our results also suggest that the two presentation media are complementary.

In the alarm list display, when comparing the alarm text (i.e., the alarm message description) and the alarm tag (alarm identification code), the findings refer that the area of interest with the highest dwell time and number of fixation is the alarm text. However, we found no statistically significant effects between the years of experience of the operators and a greater use of the alarm text or the alarm tag.

Considering the five AOIs of the alarm system, the average number of visual access and the time spend monitoring the AOIs is distributed as follows: alarm text (37% of frequency versus 41% of duration), alarm tile (25% of frequency versus 26 % of duration), alarm tag (18% of frequency versus 16% of duration), alarm value (11% of frequency vs. 9% of duration) and time and other parts of the alarm list (9% of frequency vs. 8 % of duration).

The crews looked to the alarm system at different operational stages throughout the scenario, covering the phases of monitoring, detection, decision making and implementation of the response. Therefore, operators also monitored the process through the alarm system. Further, quadratic trends (i.e., first the increase, and then the decrease of the visual activity in the alarms) occurred in periods of all three scenarios, in the number of visual accesses and in the amount of time spent on the alarm system, and correspond with the implementation of disturbances in the process. Additionally, different main effects are found during the scenario periods.

Further, during the study, multiple functions of the alarm system were observed, that are not associated with abnormal events, covering other functions than alerting, like monitoring during normal operation, for helping operators to update the status of the plant. A finding is, therefore, that alarm system often plays another role than originally planned or anticipated by the designers.

The alarm system was used as a feedback tool of certain operator actions, to support maintenance of the knowledge of the process status. We detected that operators did not only respond to alarms but also anticipated some alarms, since they observed the alarm screens for the incoming alarms. The alarm system was used with a confirmatory role, in the sense that the operators initially detect the disturbance in the process formats or large screen, and afterwards search for information at the alarm system. In occasions, operators look for alarm information at both alarm displays

consecutively. The double-checking of information allows verifying the alarm information from a second information source to validate the existing information.

Concerning how operators handle alarms, which is usually referred as alarm treatment actions, there is a different amount of actions of silence, compress and acknowledgment, without statistically significant effects, but the presentation of new alarms does influence statistically significantly in the actions taken by the operator. Furthermore, a high correlation exists between the actions of acknowledgment and silence of the reactor operators, and between compression and silence for the turbine operators.

In relation to the alarms treatment actions, it is mainly with individual actions of acknowledge and compress, instead of simultaneously all alarms belonging to both operators. Both forms of addressing alarm management were employed, in fact, by the crews.

Design recommendations as implications of the findings are provided, e.g., in relation to the configuration of the alarm system, the content of the alarm message, and interaction during alarm handling actions. Direct input on specific design features of the HSI of the simulator and the EyeCon software were also provided after the eye tracking scoring process. We consider that data and findings of this research may support human factors design guidance in the alarm system area.

Alternative explanations of the findings are provided. We found two factors that need further research: the complexity of the scenario design and the operator role. Each scenario consisted of several abnormalities, with a variable number and type of failures, which leading sometimes to masking the subsequent failure. The reactor operators presented a greater visual activity in the alarm system than the turbine operators.

Among the most important contributions of the research findings is that the detailed visual activity analysis has identified multifaceted applications of the alarms in the process control with abnormal situations, including alerting to anomalies in the process, monitoring during normal operation, update the knowledge of the process status, providing feedback on operator actions and confirm information from other information sources. The result is consistent with previous findings of field studies in the control room during normal operation.

The study addresses, from a novel approach, detailed visual activity of operator performance in alarmed situations. The analyses involve considerable effort in terms of time required to conduct the research. We consider that the results are useful for new design concepts of alarm system in hybrid and advanced control rooms. The implications of the study aim to mainly contribute to safety-related issues.

The research results on the analysis of visual activity of the operators lead to the conclusion that the alarm system is a vital element in the control room, because of the complexity of the tasks in process control, and is the main source to detect faults at the plant; however, also serves a variety of functions (alarm system philosophy), both in normal and accidental operation.

The limitations in the research project as well as how to complement the results of the study are described, and possible future research lines are also defined.

To draw some conclusions, our contribution, a small achievement in the topic of alarms in the domain of process control, in our view, the accomplishment of research continues turning out to be

indispensable in alarm system, a progress in the development of the philosophy of alarm system, incorporation of the needs and capabilities of the operators, the contribution to a better design of alarm system. Research needs in alarm issues still remain essential.

INTRODUCCIÓN

La actuación del equipo de operación en la sala de control resulta crucial para la operación segura y eficiente de la planta en entornos con sistemas tecnológicamente sofisticados y complejos, en dominios como la industria nuclear y química, la aviación o el transporte. En la sala de control de una central nuclear, los operadores monitorizan y controlan los sistemas y los componentes de la planta para verificar su correcto funcionamiento, conforme a instrucciones, normas, procedimientos de operación y administrativos, e interactúan con los sistemas y los componentes de la planta a través de la interfaz persona-sistema.

En la industria nuclear se está diseñando e implantando nuevos diseños de salas de control, también hay procesos de migración de interfaz convencional a híbrida, mediante la incorporación de tecnologías avanzadas y digitales en la sala de control. En este sentido, el sistema de alarma constituye un pilar fundamental en la seguridad de la instalación, por lo que está siendo objeto de estudio en múltiples ámbitos de aplicación para su actualización y mejora. Los avances tecnológicos han de potenciar la actuación del operador y la seguridad de la instalación, conllevan, por tanto, evaluar la tecnología en cuanto a sus efectos potenciales, negativos y positivos. Nuevas interacciones entre características de la interfaz son, a menudo, imprevisibles.

Un aspecto relevante en la modernización de la interfaz es la influencia en el rol del operador, por lo que analizamos qué tipo de tareas realiza el equipo de operación en la sala de control, destacando también aspectos relativos a las capacidades y limitaciones del ser humano en el control de procesos. La investigación en ergonomía está orientada a incorporar, en el diseño de la interfaz del sistema, las necesidades de información de los operadores y las características del comportamiento humano, siendo clave las aportaciones, desde el campo de la psicología y los factores humanos, relativas a las capacidades y limitaciones humanas en los procesos básicos y de alto nivel.

Los requisitos de diseño de las interfaces de sala de control y del sistema de alarma han ido evolucionando con los años, por lo que se expone, desde una perspectiva histórica, la normativa prescriptiva, con carácter vinculante, y las prácticas recomendadas o los documentos técnicos, de carácter no obligatorio, en cuanto a salas de control y a sistemas de alarma, con un énfasis especial en el entorno nuclear. En el marco regulatorio nuclear de España, la incorporación de requisitos de factores humanos en las modificaciones de diseño de las instalaciones es una actividad de carácter obligatorio. Además, a nivel internacional, el tratamiento de los factores humanos en la sala de control se considera, de hecho, un proceso de ciclo de vida.

En el momento actual, encontramos un gran número de deficiencias, limitaciones o problemas en los ámbitos de aplicación del sistema de alarma, abarcando no sólo la industria, nuclear o convencional, también otros dominios como el transporte marítimo, ferroviario y aéreo, o la medicina. Esto es, los retos y las dificultades del diseño del sistema de alarma se ponen de relieve al persistir los problemas de comportamiento humano relacionados con el diseño del sistema de alarma, a pesar de los esfuerzos para hacerles frente. En esta línea, se expone el análisis de incidentes y accidentes en donde el sistema de alarma jugó un papel preponderante, aunque, no obstante, matizamos que los accidentes son resultado de una serie de factores causales que, conjuntamente, desencadenan el incidente.

Ampliamente reconocida, por los resultados de investigación de la comunidad científica y por los desarrollos y aplicaciones de la industria, está la necesidad de mejorar el diseño del sistema de alarma, ilustrando la afirmación con dos fragmentos de expertos en el dominio:

Los sistemas de alarma son a menudo los aspectos menos satisfactorios del diseño del sistema de control del proceso. Hay una serie de razones para esto, incluyendo la ausencia de una filosofía clara de diseño, la confusión entre las alarmas y los estados, el uso de demasiadas alarmas, etc. Sin embargo, con el crecimiento relativo de la función de monitorizar del operador y, de hecho, del sistema de control, el sistema de alarma resulta cada vez más importante. Por tanto, este es otro campo con un amplio margen para el trabajo (Lees, 1974, p. 418).

“Si en algún momento cogiera un resumen de las alarmas y lo encontrara vacío, no lo creería. Pensaría que había algún fallo en el ordenador” (Mumaw, Roth, Vicente y Burns, 2000, p. 36).

Previamente a desarrollar la parte experimental de este proyecto de tesis, se ha contribuido en el diseño y la evaluación de sistemas de alarma avanzados, participando en estudios empíricos y experimentales, en el ámbito nacional en proyectos de I+D relativos a la introducción de sistemas de alarma avanzados en simuladores y en salas de control convencionales. Así mismo, en un equipo multidisciplinar internacional, se ha colaborado en el diseño de la interfaz del sistema de alarma para un simulador de sala avanzada, contribuyendo especialmente en el diseño funcional y en el diseño detallado del contenido del mensaje de alarma. Desde la psicología y los factores humanos, se han realizado aportaciones relevantes a la forma de presentación de la información y al diseño del contenido del mensaje de la lista de alarma, identificando las partes conceptuales relevantes e informativas. Estos proyectos de investigación fueron, en gran parte, los que motivaron la investigación actual.

¿Qué es un sistema de alarma? ¿Cuál es la función de una alarma? ¿Qué uso dan los operadores al sistema de alarma? Estas son algunas de las principales preguntas exploradas en este estudio. La revisión del estado de la cuestión permite exponer diferentes aproximaciones a la definición del término alarma y, da lugar a concluir, ineludiblemente, la importancia en la seguridad de la instalación. Profundizar en las funciones del sistema de alarma, la diversidad de usos de las alarmas, es otro de los hitos de nuestra investigación.

El tema principal es la presentación de la información: la interfaz del sistema de alarma. Otros aspectos del diseño del sistema, por ejemplo, la estructuración y el procesamiento de las alarmas, aunque resultan así mismo altamente relevantes, no se analizan en detalle.

Con el objeto de explorar las características de la interfaz del sistema de alarma, que permitan mejorar e innovar el diseño, de forma útil para el operador, y contribuir al concepto de alarma y de sistema de alarma, hemos llevado a cabo el análisis de la actividad visual de operadores profesionales de centrales nucleares en operación, mediante el análisis de datos de seguimiento de movimientos oculares, empleando un simulador, de la planta de referencia, con una presentación conceptual de interfaz de sala de control avanzada.

El sistema de alarma es una de las diversas fuentes de información disponible en la sala de control, por lo que en determinados períodos de los escenarios, hemos analizado, además, la actividad visual de los operadores en la totalidad de la interfaz de la sala de control. Esto facilita explorar la

interacción entre las alarmas y el resto de la interfaz del simulador, así como analizar la distribución de la atención del operador en función de la relevancia de las distintas fuentes de información disponibles para monitorizar y controlar la planta.

La unidad de análisis del estudio no son las fijaciones individuales, en cambio se define por la permanencia en un área de interés (AOI), que puede ser una pantalla completa, como la alarma en ventanilla, o una zona de la pantalla, por ejemplo, de la lista del mensaje de alarma. Las medidas principales están relacionadas con el número de fijaciones en las áreas de interés (datos de frecuencia) y la duración de las fijaciones en las áreas de interés (datos de duración). Abordamos el análisis de los datos desde una perspectiva estadística y una aproximación cualitativa descriptiva.

Exploramos formas diferenciadas de presentar la información de alarmas: alarmas en una posición dedicada permanente, presentación en paralelo, con un formato de alarmas en ventanillas anunciadoras, frente a alarmas en posición variable y presentación secuencial, mediante una lista de mensajes de alarma categorizada por orden cronológico.

Para entender el uso que los operadores dan al sistema de alarma, consideramos una serie de escenarios, con diferente nivel de automatización y de complejidad, con un número variado de transitorios en cada uno de ellos, llevando a cabo el análisis de datos de la actividad visual del operador durante el tiempo total del escenario, así como por períodos de tiempo definidos para cada uno de los escenarios.

En situación de anomalías, en un simulador de sala de control avanzada, los resultados indican que el equipo de operación emplea aproximadamente un 10% del tiempo disponible en el escenario observando el sistema de alarma. Si bien, el tiempo que los operadores dedican a las alarmas podría ser ligeramente superior, puesto que se presentan también alarmas en otros elementos de la interfaz de la sala de control.

El tiempo de detección del transitorio fue menor cuando se presentó un mensaje de alarma relativo a la anomalía, siendo detectados, por los seis equipos de operación, todos los transitorios con un mensaje de alarma asociado. Sin embargo, hemos encontrado también un tiempo de detección inmediato de los operadores en algunos de los transitorios sin alarma asociada, debido a que el operador estaba observando un determinado formato del proceso, cuando se produjo el cambio de estado del componente. Además, los equipos de operación realizaron con éxito la detección y el diagnóstico de los trece transitorios, excepto dos de las anomalías, cada una por un equipo diferente.

La fuente empleada para detectar un mayor número de transitorios fue la lista de alarmas, no obstante, los operadores emplearon también las alarmas en ventanillas, los formatos del proceso y la pantalla de visión general de gran tamaño, con escasa variabilidad entre los operadores en la selección, en algunos de los transitorios. Consiguientemente, las puntuaciones de los datos de duración y frecuencia son más elevadas en la lista de alarmas. En el estudio analizamos, en detalle, el empleo de las alarmas en ventanillas y en las áreas de interés de la lista de alarmas. Encontramos una elevada correlación entre la mayoría de los datos de duración y de frecuencia de las áreas del sistema de alarma.

Los turnos de operación observaron la información del sistema de alarma en las diferentes etapas de los escenarios, cubriendo las fases de monitorización, detección, toma de decisiones e implementación de la respuesta. Concluir, por tanto, que los operadores, aunque durante menos

tiempo, usaron el sistema de alarma, por ejemplo, para monitorizar el proceso, confirmando la multiplicidad de funciones del sistema de alarma.

En la gestión de alarmas, los operadores seleccionaron en mayor medida las acciones individuales de reconocimiento y comprensión de la alarma, frente a las opciones de todas las alarmas simultáneamente (las alarmas anunciadas a ambos operadores). Sin embargo, ambas formas de afrontar la gestión de las alarmas fueron empleadas. El análisis de los datos se lleva a cabo de forma estadística y cualitativa, permitiendo una exploración más detallada de los datos.

Se proporcionan explicaciones alternativas a los resultados. Hemos encontrado diferencias generales debidas, fundamentalmente, a dos factores: el tipo de escenario y el puesto del operador. Se introdujeron diferentes anomalías en los escenarios, variando el número de fallos, y las características de cada uno, dando lugar, en ocasiones, a enmascarar el fallo subsecuente. Los operadores de reactor presentan una mayor actividad visual en el sistema de alarma que los operadores de turbina, pudiendo influir el papel de los componentes del turno de operación en la sala de control, puesto que el control de la parte nuclear del proceso la realiza el operador de reactor conforme a las instrucciones establecidas, mientras que el operador de turbina se encarga de la parte convencional.

Las limitaciones se refieren, principalmente, al tamaño de la muestra debido a tratarse de operadores profesionales en activo en una central nuclear en operación durante la toma de datos, siendo una muestra incidental, en función de la disponibilidad del personal de la planta, pero los participantes representan a la población real. El uso de un simulador conlleva también algunas debilidades, a tener en consideración a la hora de generalizar los resultados, puede haber influido en determinadas variables de actuación humana. No obstante, dada la naturaleza exploratoria de la investigación, estas limitaciones consideramos que no influyen de forma significativa en una posible extrapolación de los resultados del estudio.

Entre las aportaciones más relevantes de los resultados de la investigación está que el análisis detallado de la actividad visual ha identificado una multiplicidad de usos de las alarmas en el control de procesos ante anomalías, resultado consistente con los hallazgos de estudios de campo en operación normal. El estudio aborda, desde una aproximación novedosa, el análisis detallado de la actividad visual del operador ante la anunciación de alarmas, conlleva un considerable esfuerzo en cuanto al tiempo necesario para llevar a cabo la investigación, siendo los hallazgos aplicables a conceptos futuros de diseño del sistema de alarma en la sala de control.

Los resultados de la investigación relativa al análisis de la actividad visual de los operadores llevan a concluir que el sistema de alarma constituye un elemento de importancia vital en la sala de control, debido a la complejidad de la tarea de control de procesos, es la principal fuente que tienen los operadores para detectar fallos y anomalías en la planta, pero, además, sirve a una diversidad de funciones, tanto en operación normal como accidental.

Esta introducción queremos terminarla con nuestro agradecimiento a la muestra del estudio, los operadores que han participado en la experimentación, y al Proyecto Halden por el apoyo prestado por sus técnicos e investigadores, así como por el uso y disfrute de sus instalaciones durante un período aproximado de cuatro meses, destacando el simulador NORS del laboratorio HAMMLAB, los registros de todos los datos experimentales y la estación de puntuación de movimientos oculares. Su inestimable colaboración ha sido la pieza fundamental para la parte experimental de la tesis.

1 LA SALA DE CONTROL EN EL CONTROL DE PROCESOS

Una sala de control es un lugar en donde se puede monitorizar y controlar una instalación (Brazier, 2010). Se define como una entidad funcional con una estructura física asociada, donde los operadores llevan a cabo el control centralizado, la supervisión y las responsabilidades administrativas (*International Organization for Standardization* (ISO), 2000a).

El diseño de las salas de control de centrales nucleares para la producción de energía civil tiene sus orígenes en la industria de control de procesos (como la industria química) y la marina nuclear, de donde procedió gran parte del personal (Malcolm y Harmon, 2006). La sala de control principal de una central nuclear es el centro de información y de activación de la planta para los operadores en operación normal, en incidentes operacionales anticipados, en accidentes base de diseño y en accidentes severos; también se puede utilizar como centro principal para dirigir las actividades fuera de la instalación en las etapas iniciales de una emergencia (*International Atomic Energy Agency* (IAEA), 2002).

El objetivo del diseño funcional de una sala de control es proporcionar al operador información precisa, completa y a tiempo sobre el estado de los equipos y los sistemas de la planta para todos los estados operacionales y condiciones de accidente base de diseño y para optimizar las actividades del operador en la monitorización y el control de la planta (IAEA, 2002). El sistema de Instrumentación y Control (I&C) informa a los operadores del estado seguro de la planta, pudiendo ser utilizado por los operadores para identificar las acciones manuales necesarias para mantener la seguridad de la planta (IAEA, 2002).

El personal de la planta de energía nuclear juega un papel vital en la generación productiva, eficiente y segura de la energía eléctrica (EPRI, 2003c; O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012; O'Hara, Stubler y Higgins, 2002; Persensky, Lewis y O'Hara, 2005). El personal de turno de la central comprende operadores de sala de control y operadores sobre el terreno¹ (IAEA, 2008, 2012).

Los operadores de la sala de control monitorizan (supervisan) y controlan los sistemas y los componentes de la planta para verificar su correcto funcionamiento (EPRI, 2003c; O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012; O'Hara, Stubler y Higgins, 2002; Persensky et al., 2005), de acuerdo con las instrucciones, las normas, los procedimientos de operación, los límites y las condiciones operacionales establecidas y los procedimientos administrativos (IAEA, 2008, 2012).

Los operadores sobre el terreno son responsables del control de las actividades operacionales fuera de la sala de control, tales actividades deben llevarse a cabo bajo la dirección de los operadores de la sala de control, de conformidad con las instrucciones y los procedimientos de operación correspondientes (IAEA, 2008, 2012). El personal de prueba y de mantenimiento ayuda a asegurar que los equipos de la planta funcionan correctamente, así como a restaurar los componentes cuando se producen fallos en el funcionamiento (EPRI, 2003c; O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012; O'Hara, Stubler y Higgins, 2002; Persensky et al., 2005).

¹ El operador sobre el terreno también es a veces denominado rondista, operador auxiliar, operador de campo y operador que realiza su función fuera de la sala de control.

El personal interactúa con los sistemas y los componentes de la planta a través de las interfaces persona-sistema (HSI). EPRI (2003c) define la interfaz persona-sistema como la tecnología –incluye alarmas, pantallas, procedimientos, sistemas de apoyo y controles– a través de la cual el personal interactúa con los sistemas de la planta para llevar a cabo sus funciones y tareas. La interfaz está formada por componentes de *hardware* y *software* y se caracteriza por sus propiedades físicas y funcionales (EPRI, 2003c).

En operación normal, los operadores monitorizan continuamente el estado de la planta con un subconjunto de indicadores y anunciadores o displays visuales que están ubicados en la sala de control principal. Las alarmas u otros dispositivos indican desviaciones de operación normal. Cuando esto ocurre, los operadores deben disponer de la información necesaria para identificar las acciones que realizan los sistemas automáticos, analizar la causa de la anomalía, seguir el curso del comportamiento de la planta y llevar a cabo cualquier medida manual necesaria (IAEA, 2002). En caso de incidentes operacionales u otras situaciones que den lugar a alarmas múltiples, hay que proceder, una vez que se haya estabilizado la planta, a un análisis detenido de las alarmas para identificar aquellas que sean inesperadas o incoherentes con el problema acontecido en la central (IAEA, 2012).

La gran importancia del sistema de alarma de la sala de control de una central nuclear radica en que es la principal fuente que tienen los operadores para detectar fallos y anomalías en la planta o en el proceso. Por tanto, los sistemas de alarma se utilizan para llamar la atención de los operadores sobre la necesidad de intervención en la operación de la planta por medio, por ejemplo, de la iniciación manual de funciones de seguridad, del control de la planta o de acciones de mantenimiento, para asegurar que el estado de la planta se mantiene dentro de su base de diseño (IAEA, 2002). Los sistemas de alarma son elementos clave de las salas de control, debido a la complejidad de la tarea del control de procesos (Brown, O'Hara y Higgins, 2000), siendo también componentes relevantes en los sistemas de producción, que son útiles tanto en la reducción de los costes de producción como en la mejora de la calidad del producto (Yuki, 2002).

Por último, aunque los incidentes y accidentes en las centrales han dañado a la industria nuclear, las lecciones aprendidas de la experiencia operativa han dado lugar a mejoras notables en el diseño y en la operación de la sala de control. Una lección aprendida importante es la necesidad de una mayor atención a los factores humanos² en el diseño de la sala de control, en particular en el ámbito de la presentación de la información: qué presentar y cómo hacerlo con el fin de ayudar a los operadores en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad (Malcolm y Harmon, 2006). Es más, el tratamiento de los factores humanos en la sala de control se considera un proceso de ciclo de vida (Beattie, Rochford y Vicente, 1996; O'Hara, Higgins y Fleger, 2011, 2012) y las regulaciones a menudo se basan en una estrategia de revisión de la seguridad orientada a procesos. Es necesario incorporar a los profesionales de factores humanos y organizativos en los equipos de diseño, junto con los proveedores y los titulares de licencia (*licensee*³), en los procesos de modificaciones de diseño en

² *Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance (International Ergonomics Association, 2014).* En este documento los términos ergonomía y factores humanos se tratan de forma equivalente.

³ Titular de licencia, explotador o entidad explotadora; empresa u organización autorizada por el organismo competente de la administración para la explotación de una instalación.

planta (*Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations* (OECD, NEA, CSNI), 2009a).

A continuación en el capítulo procedemos a caracterizar una sala de control convencional, la motivación para llevar a cabo el proceso de modernización de la sala de control, la conceptualización de una sala de control avanzada, para terminar con el impacto en la actuación humana de la introducción de nuevas tecnologías en la sala de control.

1.1 SALA DE CONTROL CONVENCIONAL⁴

La sala de control diseñada con interfaces persona-sistema analógicas con tecnología basada en cableado (*hardwired*), frecuentemente denominada sala de control convencional, consta de grandes espacios de trabajo, con pantallas, indicadores y controles en posiciones específicas, espacialmente dedicadas, mostradas en paralelo (la información se presenta simultáneamente), en posición predeterminada. Las pantallas suelen proporcionar indicación de parámetros individuales y, asimismo, los controles suelen ser componentes individuales. Los operadores integran la información distribuida en diversos instrumentos de la sala de control, basándose en la coordinación, la comunicación, la formación y la experiencia del equipo.

La configuración de la sala de control convencional da lugar a la expresión, comúnmente empleada en la industria nuclear, relativa a que los operadores “caminan frente a los paneles” (“*walk the boards*” o “*walking along the panels*”) para monitorizar la información y realizar las operaciones de control de planta, desde la posición de pie (Emigholz, 1996; Kragt, 1984; O’Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2001, 2002a; O’Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008). La figura 1-1 muestra la sala de control de la C.N. de Vandellós, en Tarragona.



Figura 1-1. Sala de Control de C. N. de Vandellós, Tarragona (Endesa, n.d.).

Estas salas de control generan un “ambiente abierto”, un amplio horizonte de observación, que proporciona a los equipos de operación una visión compartida del estado del proceso (de la planta) y

⁴ Determinadas partes del capítulo de salas de control han sido presentadas, en idioma inglés, relacionadas con la introducción de nuevas tecnologías en la sala de control, en Torralba y Martínez Arias (2010).

también les permite mantener la conciencia de la situación de las actividades de los otros miembros del equipo (EPRI, 2003e; IAEA, 2001; Kaarstad, Nystad y Strand, 2011; Roth, Mumaw y Stubler, 1992; Silva Junior, Borges y Carvalho, 2012). Es posible inferir información sobre el tipo de acción de control realizada por el operador, y el sistema de la planta afectado, mediante la observación de las actuaciones del operador en los controles y la localización de esos controles en los paneles (EPRI, 2003e; Kaarstad et al., 2011; Roth et al., 1992), sin tener que solicitar información a otros componentes del equipo (van der Schaaf, 1989).

EPRI (2003e) también describe que la forma de interacción entre los miembros del equipo de operación puede ser considerada abierta, puesto que gran parte de las interacciones se realizan mediante comunicación verbal, que se puede escuchar desde el otro lado de la sala de control.

1.2 PROCESO DE MODERNIZACIÓN DE LA SALA DE CONTROL CONVENCIONAL

La mayoría de las plantas de energía nuclear convencionales actuales fueron diseñadas y construidas entre 1960 y 1990. El diseño de I&C de las plantas convencionales se realizó con componentes analógicos y relés y, en algunos casos, con tecnología digital básica. El equipo de I&C está próximo a exceder su expectativa de vida, lo que aumenta los esfuerzos de mantenimiento para lograr un comportamiento aceptable del sistema y, además, la baja disponibilidad de piezas analógicas de repuesto aumenta el coste de operación y de mantenimiento. Los problemas de la obsolescencia de los equipos y de una tecnología antigua limitan las posibilidades de añadir nuevas capacidades a los sistemas y a las interfaces de la planta.

Por otro lado, las centrales nucleares se encuentran bajo una gran presión para operar de manera rentable, especialmente en los países donde la desregulación del mercado existe, es importante mejorar la posición competitiva de la planta para ser un proveedor de energía preferido y, al mismo tiempo, mantener o mejorar la operación segura de la planta (IAEA, 2001). En este contexto, la modernización de los sistemas de I&C, los ordenadores de proceso y las salas de control se está convirtiendo en una necesidad para mejorar la rentabilidad de la operación (IAEA, 2001).

Como parte integral del programa de modernización de I&C, la sala de control suele estar sujeta a un proceso de actualización. Ha llevado a la incorporación de avances tecnológicos para la mejora de las salas de control convencionales, de los centros de parada remota y de los paneles locales de las centrales nucleares existentes, en el marco de los programas de modernización. En general, la transición de una sala de control analógica (convencional) a una sala de control computarizada (avanzada), implica la ubicación de la información del estado de la planta en pantallas de visualización que están integradas en las estaciones de trabajo de los operadores.

Los procesos de modernización suelen realizarse de forma escalonada, por ejemplo, I&C relacionada o no relacionada con la seguridad por sistemas, aunque algunas centrales nucleares en operación desde los años setenta han llevado a cabo el cambio completo de la sala de control en una única etapa, como es el caso de dos centrales nucleares de Suecia: la unidad 2 de C. N. Ringhals (Lang, 2007, 2009, 2010) y la unidad 1 de C. N. Oskarshamn (Gunnarsson, 2007, 2010; Gunnarsson y Eliasson, 2010, 2011; Gunnarsson y Farbrot, 2005), reemplazando paneles y consolas con interfaces basadas en pantallas y manteniendo también cierta tecnología convencional. Centrales nucleares más modernas o en construcción incorporan en su diseño equipos basados en ordenador (computarizados) para los indicadores y los controles de sistemas de la sala de control, tales como el reactor avanzado de

agua en ebullición (ABWR) de General Electric, en construcción en C. N. Lungmen, Taiwan (Chuang y Chou, 2005, 2008; Chuang, Chou, Chen y Shiao, 2008; Hwang et al., 2009; C. M. Lee, Tsai, Wong y Pang, 2009) y el Reactor Europeo EPR (*European Pressurized Reactor*) de la unidad 3 de C. N. Flamanville de Electricité de France (EdF) (De la Garza y Labarthe, 2010; Labarthe y De la Garza, 2011).

Además, el desarrollo tecnológico ofrece nuevos diseños de interfaz persona-sistema con el fin de apoyar las tareas del operador en la sala de control. El trabajo cooperativo asistido por ordenador (*Computer-Supported Cooperative Work* o CSCW) se desarrolla para apoyar el trabajo colaborativo entre los individuos que utilizan tecnologías basadas en informática como medio de comunicación, siendo sus elementos clave los siguientes: proporcionar un marco de referencia común, apoyar la conciencia de las actividades de otras personas, disponer de espacios de trabajo colaborativos y de herramientas para la interacción de los equipos con pantallas de CSCW (EPRI, 2003e; O'Hara, Pirus y Beltracchi, 2004). Las pantallas de visualización grupal (*group-view displays*) (Roth et al., 1998; Stubler y O'Hara, 1996), las pantallas compartidas (Bolstad y Endsley, 1999, 2000; Douglas, Aleva y Havig, 2007), las pantallas de información general de gran tamaño (Dudfield, Macklin y Fearnley, 2000; Hårefors, 2008) presentan, simultáneamente, información de la planta a los miembros del equipo. Las pantallas de visualización grupal apoyan la actuación del equipo, permitiendo a múltiple personal observar con simultaneidad la información. En las salas de control convencionales, éstas se presentan en pantallas de gran tamaño y, cuando el equipo de operación necesita desplazarse por la sala de control, continúa disponiendo de la información (Stubler y O'Hara, 1996). Los displays de visión grupal de gran tamaño ofrecen un mecanismo potencial para reproducir la "imagen global" (*big picture*) y la conciencia de la situación compartida, que son características inherentes de las salas de control tradicionales (Roth et al., 1998).

1.2.1 Participación del usuario final

La experiencia ha demostrado que la participación del personal de operación, del usuario, es fundamental para el éxito de cualquier diseño o modificación de la interfaz persona-sistema (EPRI, 2003e). La participación del usuario final es muy importante durante todo el proceso de modificación del diseño de la planta (OECD, NEA, CSNI, 2009a), siendo relevante que los operadores desempeñen un papel activo desde el inicio del proceso, ya que varias de las decisiones tienen que tomarse al principio del proyecto (Laarni y Norros, 2006; Luquetti dos Santos, Farias, Ferraz, Haddad y Hecksher, 2013). El enfoque orientado al usuario, durante todo el ciclo de vida, es más eficaz que un enfoque centrado en la tecnología, que evoluciona rápidamente (IAEA, 2001). La incorporación de operadores a los equipos de diseño facilita una definición más completa de las necesidades y el perfeccionamiento de los conceptos de diseño (Davey, 2000).

De Vries (2000) presenta la experiencia adquirida durante la ejecución de un amplio proyecto de modernización llevado a cabo en la central nuclear de Borssele (Países Bajos), concluyendo que la participación de los usuarios finales en el proceso de diseño, ingeniería y puesta en marcha de las interfaces es crucial para la aceptación de la nueva tecnología y del diseño de la sala de control. Los operadores constituyen una fuente importante de información con respecto a las decisiones sobre la facilidad de uso del sistema, su participación en el diseño facilita también la aceptación del diseño, además de incorporar los requisitos y las necesidades del personal de operación en la fase de la ingeniería de especificación del diseño (Hoonhout y Zwaga, 1993; Zwaga y Hoonhout, 1994). Laarni y Norros (2006) y O'Hara, Persensky y Bongarra (2006) han encontrado que la participación e

implicación del personal de la planta aumenta durante la duración del proceso de modernización y es, a menudo, mayor de lo esperado.

El personal de planta suele mostrar cierta resistencia a las nuevas tecnologías de interfaces digitalizadas (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2004; O'Hara, Persensky y Bongarra, 2006), sobre todo si el antiguo sistema sigue funcionando bien (Laarni y Norros, 2006). Las primeras versiones de las nuevas interfaces son a menudo deficientes, o incluso peores que las interfaces precedentes y, normalmente, se necesita tiempo para satisfacer las necesidades que tienen los operadores con el nuevo diseño (Laarni y Norros, 2006). Los resultados de Laarni y Norros (2006) también mostraron que existe una fuerte creencia en las empresas en que la contribución de los operadores es necesaria y que son capaces de resolver problemas de diseño.

Por último, la introducción de nuevos sistemas⁵ suele presentar nuevas demandas en materia de formación y en los procedimientos (Laarni y Norros, 2006; S. J. Lee y Jung, 2013; O'Hara y Hall, 1992; O'Hara, Persensky y Bongarra, 2006).

1.3 SALA DE CONTROL AVANZADA

Las salas de control avanzadas son más compactas, de menor tamaño, con los indicadores y los controles presentados en las estaciones de trabajo para los operadores sentados y con un nivel más elevado de automatización (EPRI, 2002; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; O'Hara, Higgins y Brown, 2009; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008; Roth et al., 1992).

Facilita un amplio rango de modos de presentación de información, por ejemplo, tendencias, sinópticos del proceso y pantallas de visión general. Los sistemas de displays utilizan formatos gráficos, pueden tener una gran cantidad de pantallas, de las cuales sólo un pequeño número se puede ver simultáneamente, en cualquier momento, en las estaciones de trabajo. Gran parte de la información suele estar disponible de forma secuencial. Asimismo, la presentación del sistema de tendencias de forma digital mejora la capacidad de registrar la anomalía y añade una flexibilidad adicional como, por ejemplo, cambiar la escala vertical y aumentar o disminuir el tiempo de presentación (Shaw, 1993). De modo complementario, se puede proporcionar una pantalla de gran tamaño y sistemas de apoyo a la operación computarizados (COSS). Los sistemas de apoyo ayudan a mejorar el comportamiento del operador por el pre-procesamiento de datos, interpretan el estado de la planta, asignan prioridad a los objetivos y prestan asesoramiento; también ayudan al operador a centrar la atención en los datos más relevantes y en los problemas más prioritarios, así como a adaptar dinámicamente los planes de respuesta a las situaciones cambiantes (S. J. Lee y Seong, 2014). COSS son ayudas a la decisión para las funciones cognitivas del operador, tales como sistemas de procedimientos computarizados (O'Hara, Higgins, Stubler y Kramer, 2000) y sistemas de alarma avanzados que suelen incluir opciones en la interfaz para, por ejemplo, ordenar las alarmas, obtener alarmas suprimidas, consultar la lógica de la alarma, modificar los puntos de tarado establecidos o definir alarmas temporales. Sin embargo, un sistema de apoyo no garantiza un mejor rendimiento del operador (Kim y Seong, 2007; S. J. Lee y Seong, 2014), sistemas de apoyo inapropiados o sistemas de automatización pueden causar efectos adversos (S. J. Lee y Seong, 2014; Yoshikawa, 2005), como

⁵ La tecnología, por sí sola, no es suficiente para resolver problemas genéricos y difíciles, como la sobrecarga de datos, problemas que existen en la intersección de la cognición, la colaboración y la tecnología (Woods, Patterson y Roth, 2002).

disminuir la capacidad de conciencia de la situación y aumentar la carga mental del operador (S. J. Lee y Seong, 2014).

El control de los sistemas y componentes de la planta puede ser realizado mediante controles basados en *software*, tales como botones e iconos definidos en la pantalla (S. J. Lee y Jung, 2013; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008; Stubler, O'Hara y Kramer, 2000), siendo controles particularmente propensos a determinados tipos de errores, que pueden afectar al rendimiento general del sistema y a la seguridad, por lo que Stubler y O'Hara (1998) aplican aproximaciones de diseño para reducir la probabilidad de estos errores.

Hay ventajas claras en las salas de control avanzadas, siendo una de las principales la flexibilidad de las nuevas tecnologías: los datos del estado de la planta pueden vincularse al contexto real, ser procesados y presentados en diferentes formatos, con el objeto de mejorar los problemas específicos del control de procesos (Easter, 1991; Roth et al., 1998; Vicente, Mumaw y Roth, 1997), permitiendo a los diseñadores presentar la información de una manera mucho más adecuada a las demandas cognitivas y a las tareas del personal (Kaarstad et al., 2011; Kaarstad, Strand y Nihlwing, 2008a). Y, además, los operadores, así como el supervisor de turno, pueden configurar las pantallas de visualización de su puesto de trabajo para presentar pantallas adaptadas a sus tareas individuales (Roth et al., 1998; Vicente et al., 1997). Una ventaja adicional es que la sala de control avanzada permite la mejora de las técnicas de validación de señales (EPRI, 2003e; Kaarstad, Strand y Nihlwing, 2008b).

Entre los aspectos problemáticos de la sala de control avanzada destacar que los datos del estado de la planta no se presentan espacialmente dedicados y que, puesto que sólo se puede acceder desde una posición determinada a los procedimientos, a las indicaciones y a los controles, los operadores tienen una mayor probabilidad de permanecer concentrados en su estación de trabajo, por lo que la capacidad de observar lo que hacen los demás y de compartir una visión común del estado de la central se reduce (O'Hara, Pirus y Beltracchi, 2004; Roth et al., 1998; Stubler y O'Hara, 1996; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000). Por consiguiente, las actividades y las acciones llevadas a cabo en una sala de control avanzada pueden resultar menos visible para el resto del equipo y pueden ser más difíciles de interpretar que las acciones realizadas en un panel de control convencional, por lo que, podría conllevar que la conciencia del equipo de las acciones de cada miembro se vea reducida, en comparación con la sala de control convencional.

O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) argumentan que existen ventajas y desventajas entre los beneficios de la flexibilidad y los costes que a su vez impone a los operadores, por ejemplo: 1) mayores demandas de gestión de la interfaz, como el grado en que la carga de trabajo asociada al uso de la flexibilidad desvía recursos cognitivos de las tareas primarias (para controlar la planta)⁶; 2) los efectos de la flexibilidad para poder llevar a cabo la tarea primaria; 3) otros miembros del equipo de operación tienen que observar o utilizar componentes de la interfaz que han sido modificados. Woods (1993, citado en O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008) destaca que ante la flexibilidad de la interfaz computarizada, los operadores deben decidir qué información quieren, cómo recuperarla, qué interfaz utilizar para recuperarla, dónde y cómo debe mostrarse, coordinar las pantallas existentes con la nueva información. Esto conlleva la capacidad de procesamiento de la información controlado (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008), que resulta cognitivamente más demandante, requiere que los

⁶ El concepto de tarea primaria y secundaria se describe posteriormente en la sección 2.1 tipos de tareas que desempeña el operador.

operadores tomen decisiones acerca de la interfaz, así como disponer de un mayor conocimiento y más habilidades para usar la interfaz que en plantas convencionales (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a).

1.4 IMPACTO DE LA INTRODUCCIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

La introducción de nuevas tecnologías suele percibirse como prometedora para mejorar el funcionamiento seguro de las centrales nucleares; con el fin de garantizar la adecuada aplicación de la tecnología para apoyar la actuación humana y la seguridad de la planta, es importante evaluar los avances tecnológicos en cuanto a sus efectos potenciales, negativos y positivos (OECD, NEA, CSNI, 2009b).

La introducción de tecnologías y nuevas formas de presentar la información del proceso en la sala de control ofrece nuevos diseños de interfaz persona-sistema para apoyar las tareas de los operadores de sala de control, que a su vez puede tener un impacto en el trabajo del operador, en aspectos como la filosofía de operación, el trabajo en equipo, las prácticas de trabajo, la conciencia de la situación, la carga de trabajo y la confianza. EPRI (2002) presenta detalladamente las principales diferencias existentes entre las salas de control convencionales y las salas de control modernas (con nuevas tecnologías de I&C digital y de interfaz persona-sistema), para ello proporciona dos tablas, una relativa a las diferencias en el concepto de operación y otra relacionada con la gestión de fallos por el equipo de operación.

El *concepto de operación* se refiere a la manera en que el equipo de operación está organizado y cómo monitoriza y controla la planta en condiciones normales y anómalas, lo que incluye, según EPRI (EPRI, 2003e): tamaño y composición del equipo, funciones y responsabilidades en la sala de control, nivel de automatización, asignación de tareas a los miembros del equipo en las diferentes condiciones de operación, coordinación y supervisión del equipo, operación en condiciones de fallo o de degradación de la I&C o de la interfaz y la forma de interactuar el equipo de la sala de control con el resto del personal de la planta (técnicos de mantenimiento, ingenieros, personal de emergencia, etc.). O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) y O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al. (2008) estructuran el concepto de operación en cinco dimensiones: rol del personal y automatización, recursos humanos y formación, gestión de la operación normal, gestión de anomalías y emergencia, mantenimiento y gestión del cambio.

La modernización de la interfaz de la sala de control influirá en el concepto de operación de la planta. La tecnología disponible en la actualidad proporciona la infraestructura para introducir cambios en el concepto de operaciones de la planta, que ayudará a cumplir con los objetivos a largo plazo de una operación más económica, eficiente y segura (O'Hara et al., 2009). El concepto de operación en las centrales nucleares ha cambiado muy poco en el primer medio siglo de generación de energía nuclear comercial (O'Hara et al., 2009), no obstante, se espera que los reactores avanzados presenten un concepto de operación y de mantenimiento que será diferente del actual de los reactores convencionales (EPRI, 2002; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2004, 2008; O'Hara, Higgins, Brown, Kramer y Persensky, 2004; O'Hara, Persensky y Szabo, 2006; Persensky et al., 2005). Los documentos de concepto de operación se utilizan cada vez más en una amplia gama de industrias, siendo especialmente apropiados en las primeras etapas de diseño, con el fin de identificar los objetivos y las expectativas de diseño en relación con la actuación humana (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

Con la modernización de la interfaz, en cuanto a los roles y las responsabilidades, el operador realiza menos tareas de bajo nivel (como obtener lecturas de sensores individuales o revisar los indicadores de estado), además el operador actúa en mayor medida como un supervisor⁷ de los sistemas automatizados (Emigholz, 1996; EPRI, 2003e; Fickelscher y Chester, 2013; Han, Yang y Im, 2007; Hoonhout y Zwaga, 1993; Laberge, Bullemer, Tolsma y Reising, 2014; Meister, 1995; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara y Hall, 1992; O'Hara, Higgins y Kramer, 2000; Sorkin y Woods, 1985; Zwaga y Hoonhout, 1994). Los roles y las responsabilidades del equipo de operación pueden verse afectados, puesto que se incluirá un mayor nivel de automatización en la interfaz y en todos los aspectos de operación de la planta (EPRI, 2002; O'Hara y Hall, 1992; O'Hara et al., 2009; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2004, 2008; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008). A más de esto, la división de responsabilidades y la asignación de tareas entre los operadores cambiará cuando se introduzca una mayor automatización (EPRI, 2003e; Licao, Li, Pengcheng, Hong y Yanhua, 2014). Un ejemplo es que el equipo de operación podría controlar, simultáneamente, desde una sala de control común, módulos múltiples en diferente estado operacional. Por lo que los organismos reguladores necesitarán nuevas herramientas para las actividades de licenciamiento y monitorización. Para ello, *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC) desarrolla bases técnicas para definir nuevas directrices (O'Hara, Higgins, Brown, Kramer y Persensky, 2004; O'Hara, Persensky y Szabo, 2006; Persensky et al., 2005), que comúnmente son adoptadas a nivel internacional.

Los efectos típicos en una sala de control, debidos a un cambio de tecnología analógica a tecnología digital, con respecto a la interfaz, pueden ser los siguientes (Braseth et al., 2009; Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain, 2008; Chang, Choi, Park, Heo y Kim, 1999; EPRI, 2003e; O'Hara y Hall, 1992; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2004, 2008; Roth y O'Hara, 2002; Roth et al., 1992; Salo, Laarni y Savioja, 2006; Shaw, 1993; Vicente et al., 1997):

- La gran cantidad de información del proceso y de alarmas puede influir en la comprensión que tienen los operadores del estado del proceso, es decir, en la conciencia de la situación y en el mantenimiento del conocimiento de las acciones de los miembros del equipo.
- El espacio limitado de las pantallas para la presentación de información puede dar lugar al efecto *keyhole* (denominado *windowing* por Kirwan, 2001), esto es, gran parte de la información está oculta a la vista, se hace necesario un uso secuencial de la información. Pérdida de la habilidad de reconocimiento de patrones. El efecto *keyhole* es esencialmente una prolongación del efecto denominado *cognitive tunneling* o *cognitive tunnel* (Braun, Grimes y Shaver, 2011), descrito en el apartado 2.3.2 de limitaciones del operador.
- Los operadores tienen que navegar en la interfaz para encontrar la información importante, pudiendo aumentar la carga cognitiva del operador debido a las mayores demandas en las tareas de gestión de la interfaz (tareas secundarias).
- Los controles basados en *software* pueden aumentar las tareas secundarias, en especial el esfuerzo y la carga mental.
- Los operadores tienen que colaborar, trabajar en equipo, pero podrían acudir a diferentes fuentes de información y obtener puntos de vista individuales de la planta.

⁷ En especial en la industria petroquímica, el papel del operador durante operación normal ha pasado de un rol activo para intervenir en las operaciones del proceso a una función de supervisión o monitorización de un sistema automático (Emigholz, 1996; Fickelscher y Chester, 2013; Han, Yang y Im, 2007; Hoonhout y Zwaga, 1993; Laberge et al., 2014; Zwaga and Hoonhout, 1994). Requiere que el operador intervenga siempre que se produce un fallo del sistema, ayudando el sistema de alarma al operador en esta tarea.

- Los controles son accesibles desde varias estaciones de trabajo diferentes, por lo que resulta posible que más de un operador realice tareas que implican al mismo equipo, sin tener plena conciencia de las acciones y de las intenciones específicas de control de los otros miembros del turno de operación.
- Puede requerir el desarrollo consciente de la cooperación y de las prácticas de comunicación del equipo de operación.
- El equipo de operación requiere una mayor comprensión de las funciones automáticas; la dificultad de entender cómo trabajan los sistemas avanzados.
- La retroalimentación del sistema debe ser optimizada, ya que si es muy rápida e inadecuada puede aumentar la carga mental.
- La identificación, la corrección y la recuperación de errores puede resultar más difícil y poner en peligro la fiabilidad del sistema sociotécnico.

Mientras que la interfaz avanzada puede mejorar en gran medida el comportamiento del operador y de la planta, es importante reconocer que, si está mal diseñada e implementada, existe el potencial de influir negativamente en el comportamiento humano, aumentar los errores y reducir la fiabilidad humana (EPRI, 2003e; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Las pantallas tienen que estar diseñadas para satisfacer las necesidades de información del personal de la planta y para minimizar las tareas de gestión de la interfaz, especialmente en situaciones de elevada carga de trabajo (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; O'Hara, Pirus y Beltracchi, 2004).

Heslinga y Herbert (1995, citado en O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a) realizaron una encuesta a diseñadores, gestores y operadores de plantas de ocho países europeos sobre sus experiencias en la introducción de interfaces computarizadas en diseños de nuevas plantas o en procesos de modernización. Encontraron que los operadores tenían problemas para localizar la información en las organizaciones de redes de pantallas basadas en sistemas (especialmente para operaciones no rutinarias) y que los operadores se mostraron reticentes a participar en las tareas de gestión de la interfaz. Debido a las dificultades asociadas con la navegación y el acceso serial de la información, los operadores prefirieron utilizar interfaces convencionales, incluso cuando estaban disponibles interfaces avanzadas, argumentando que la interfaz convencional proporcionaba una mejor visión general y un acceso más directo a la información. En situación de incidente, los operadores tienden a emplear las fuentes de información conocidas.

O'Hara et al. (2001) también detectaron, en diversas industrias, un hallazgo consistente relativo a que los operadores indicaban que no disponían de suficientes pantallas de visualización de datos en las salas de control computarizadas. Encontraron tres razones principales, en primer lugar, como parte de una estrategia de gestión de la carga mental, los operadores con frecuencia evitaban las tareas de navegación en la interfaz, no accediendo a toda la información disponible, prefiriendo en su lugar utilizar un conjunto fijo de pantallas conocidas, que proporcionaban gran parte de (pero no toda) la información necesaria. En segundo lugar, el diseño de la pantalla no suele realizarse con las tareas del operador en mente. El método más común de representación de la información es por funciones y sistemas. Como las tareas típicamente se realizan a través de muchos sistemas, los operadores necesitan una diversidad de pantallas. Por último, hay un concepto de operación diferente en los diseñadores y los operadores. Las salas de control basadas en ordenador están diseñadas con multitud de datos, disponibles a través de cientos de pantallas, vistos por el operador en un número limitado de dispositivos de visualización. Los diseñadores esperan que los operadores utilicen la flexibilidad de las interfaces para adaptar la configuración a las demandas de cada situación. Sin embargo, los operadores

no suelen hacer eso, en cambio configuran las interfaces de una manera espacialmente dedicada (O'Hara et al., 2001; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2004).

1.5 SIMULADORES

Los simuladores tienen la función de formar a los operadores en el uso adecuado de las herramientas del lugar de trabajo, siendo en el ámbito nuclear de obligado cumplimiento el entrenamiento inicial y la realización de una parte del examen en un simulador de alcance total adecuado y aceptado por el organismo regulador en España, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), para la obtención de licencias del personal de operación así como la realización de un entrenamiento anual en dicho simulador para la renovación de licencias del personal de operación en las centrales nucleares españolas (CSN, 2007). En la figura 1-2 se muestra el simulador de la sala de control de la central nuclear de Cofrentes.

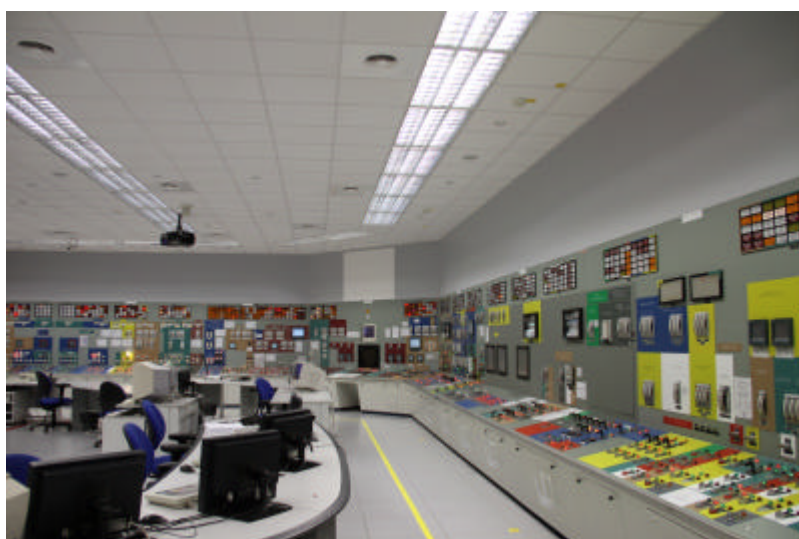


Figura 1-2. Simulador de la sala de control de C. N. de Cofrentes (Foro Nuclear, n.d.).

Los operadores, en los dominios de alto riesgo, no pueden ser formados en el mundo real por motivos de seguridad, económicos o deontológicos, por lo que se emplean los simuladores (De Keyser y Nyssen, 2001). Entre las razones o ventajas de elegir los simuladores en lugar del entorno operativo real, proporcionadas en Flexman y Stark (1987) y Stanton (1996b), cabe destacar la baja frecuencia de uso o la falta de disponibilidad del entorno real, la flexibilidad del simulador para la programación temporal de las sesiones, los simuladores habitualmente resultan más seguros que el equipo real, recogen datos de actuación de los operadores en una variedad de escenarios (en ocasiones las condiciones –denominadas transitorios y escenarios en el dominio nuclear– no han ocurrido en el entorno de referencia o no pueden ser entrenadas en el entorno operativo), controlan las condiciones del entorno y pueden resultar económicamente más rentables que el equipo real (con costes más bajos de adquisición y de operación).

El uso de los simuladores encaja en cuatro grandes categorías –investigación, evaluación, análisis y formación– (Stanton, 1996b). Históricamente, desde 1929, los simuladores han servido para formación en el dominio de la aviación (Flexman y Stark, 1987; Heintzman, 1984 citado en Kluge et al., 2009). Los simuladores de control de procesos se han empleado durante muchas décadas para la formación de los equipos de operación. Los primeros simuladores para la formación de operadores de

plantas de energía se desarrollan desde finales de los 50 (Chen, 1980). El simulador del sistema de propulsión nuclear del buque Savannah se definió para la formación en operación del personal de ingeniería en 1959 (Chen, 1980; Wade, 1980). El primer simulador a escala total de una planta de energía se construyó para General Electric (GE) en 1968, mientras que el simulador de Indian Point II representó el primer simulador de una central nuclear de la industria eléctrica (Chen, 1980). Boring (2011) destaca que en 1973 se habían desarrollado simuladores totalmente funcionales para las siguientes instalaciones de Estados Unidos de América: el reactor de la unidad 2 de Dresden –centro de formación de GE BWR– en Morris (Illinois), la planta PWR Zion de Westinghouse en Lake Michigan (Illinois) y la planta de ingeniería de combustión de la unidad 1 de Calvert Cliffs en Windsor (Connecticut).

Entre los beneficios de los simuladores de formación y entrenamiento, el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1998) incluye la capacidad de entrenar en funcionamiento anormal, transitorios y accidentes, la reducción del riesgo en los equipos de la planta y al personal, la capacidad de repetir un escenario tantas veces como sea necesario para su comprensión y retención, la capacidad de experimentar los acontecimientos antes de que sucedan en la planta, la habilidad para capacitar al personal sobre los acontecimientos reales de la central, un medio rentable para los objetivos de formación, la oportunidad de alcanzar nuevos objetivos de formación, la obtención de excelencia en la formación, en especial para las tareas cognitivas de alto nivel, y la adquisición y retención de los conocimientos sobre los procesos de la planta.

Clymer (1980) clasifica los simuladores de formación, pudiendo cualquier simulador encajar en uno o más de los siguientes tipos de simulador:

- El simulador réplica contiene un completo y exacto duplicado de la interfaz persona-sistema y una representación realista del entorno sensorial del sistema simulado.
- El simulador genérico es una representación de una clase de sistema sin ser una réplica de ninguno.
- El simulador ecléctico incluye una combinación de características con el objeto de ampliar la experiencia adquirida por los alumnos.
- El simulador total comprende la totalidad de las tareas del operador para controlar el sistema simulado.
- El simulador parcial de algunas tareas del operador y de la parte relevante de la misión.
- El simulador de principios básicos es un simulador genérico o parcial, o ambos tipos, que omite numerosos detalles por economía y simplicidad. Permite demostrar todos los comportamientos importantes del sistema.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1996b, 1998, 2003, 2004) clasifica los simuladores en los siguientes cuatro tipos:

- El simulador de principios básicos ilustra los conceptos generales, la operación básica de los sistemas complejos, los procedimientos de operación y los procesos físicos de la planta.
- El simulador a escala real (o simulador de alcance total) modela los sistemas de la planta de referencia en el entorno real de la sala de control, esto es, las consolas de operación y su funcionamiento son una réplica de la sala de control.
- Otros tipos de simuladores de la sala de control son aquellos que no proporcionan la misma interfaz persona-sistema existente en la planta de referencia, mientras que el modelo

termohidráulico de la planta pudiera ser idéntico al simulador a escala real. Incluye los simuladores analítico, funcional, gráfico y multi-funcional.

- El simulador parcial sólo modela detalladamente unos determinados sistemas de la planta de referencia.

HAMMLAB (*Halden Man-Machine LABoratory*) es un simulador específico para investigación, desarrollado en el marco del Proyecto del Reactor Halden de la OCDE, en adelante Proyecto Halden, que incorpora instrumentación y controles digitales más avanzados que la planta de referencia (ver Figura 1-3). De acuerdo con Boring (2011), los simuladores de investigación presentan una serie de ventajas con respecto a los simuladores de formación, como son la disponibilidad de la instalación, la flexibilidad de la configuración del simulador para las situaciones operativas y plantas de referencia, la flexibilidad de recogida de datos en equipos avanzados así como la flexibilidad para configurar la interfaz persona-sistema. No obstante, los simuladores de investigación también presentan limitaciones, entre las que cabría destacar la generalización de los resultados. HAMMLAB permite probar y mejorar las tecnologías de la sala de control, siendo la interfaz equivalente funcionalmente a la planta de referencia (Boring, 2011). Existe evidencia para sugerir que los simuladores que son similares funcionalmente (fidelidad funcional o psicológica) generarán resultados comparables entre sí (Stanton, 1996b).

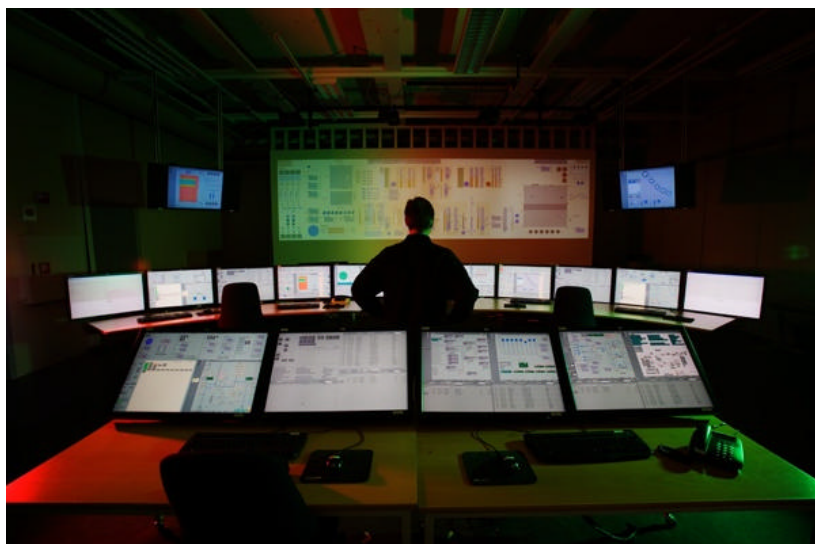


Figura 1-3. Laboratorio HAMMLAB 2009 del Proyecto Halden.

El simulador NORS (*NOKia Research Simulator*) de un reactor de agua a presión (PWR) de la sala de control de HAMMLAB ha sido empleado para llevar a cabo el estudio experimental de este proyecto.

1.6 APROXIMACIÓN REGULADORA AL TRATAMIENTO DE LOS FACTORES HUMANOS EN LA SALA DE CONTROL DE UNA CENTRAL NUCLEAR

La normativa reguladora proporciona el marco contextual de las actividades de factores humanos en el diseño y en la evaluación de las salas de control de centrales nucleares, aplicable, por tanto, al sistema de alarma. Se ha incluido una sección detallada de la aproximación reguladora para destacar la importancia que ha adquirido, desde el punto de vista regulador, y como consecuencia

también de la instalación nuclear, la consideración de criterios y métodos de factores humanos. Para el diseño, el desarrollo, la implementación y la evaluación de un sistema de alarma es de referencia ineludible el conocimiento de la normativa vigente.

En esta sección se presenta, en primer lugar, la normativa de las centrales nucleares de Estados Unidos, al ser el referente primordial para el desarrollo de la regulación nuclear en España, descrita posteriormente en segundo término.

1.6.1 Regulación de factores humanos en centrales nucleares de Estados Unidos de América

El organismo regulador *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (U.S. NRC) presenta una regulación informada por el riesgo y basada en la actuación. Entre sus funciones como organismo regulador nuclear desarrolla, revisa y modifica directrices, guías y estándares que los titulares de la licencia deben cumplir para obtener o mantener una licencia o certificar el uso de materiales nucleares y operar una instalación nuclear. Lleva a cabo programas de investigación y revisiones independientes para fundamentar sus decisiones reguladoras.

Las leyes de Estados Unidos conceden potestad a las Agencias Federales, como la NRC, para poder emitir las disposiciones reglamentarias denominadas *rules and regulations* (regulaciones), que desarrollan con detalle aspectos de las leyes aprobadas por el Congreso, son de obligado cumplimiento. Todas las regulaciones emitidas por la NRC están recogidas en el capítulo I del Título 10 del Código de Regulaciones Federales (CFR) de los Estados Unidos. El 10 CFR 50 *Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities* recoge los requisitos necesarios para el licenciamiento (denominado bases de licencia) de las centrales nucleares productoras de energía eléctrica autorizadas por la NRC, tales como las autorizaciones de construcción, los permisos de explotación de centrales nucleares o la documentación a presentar a la NRC. La base reguladora para la consideración de la ingeniería de factores humanos está fundamentalmente en 10 CFR 50, parte 34. El diseño de la sala de control debe reflejar el estado del arte de los principios de factores humanos.

El marco para la realización de revisiones de seguridad de los aspectos de la ingeniería de factores humanos por parte de los inspectores de la NRC, tanto de nuevas plantas como de modificaciones de plantas existentes, está recogido en el capítulo 18 del *Standard Review Plan*⁸ (SRP) NUREG-0800 (*Nuclear Regulatory Commission* (NRC), 2007). Las directrices específicas para las revisiones de diseño de la ingeniería de factores humanos se proporcionan en el Modelo de Revisión del Programa de Ingeniería de Factores Humanos (*Human Factors Engineering Program Review Model* o HFE PRM) del NUREG-0711 (O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012) y en las directrices de revisión de diseño de la interfaz persona-sistema del NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). En conjunto, estos documentos constituyen la base para el proceso utilizado por el personal para revisar los programas de ingeniería de factores humanos y los diseños de interfaces persona-sistema de los solicitantes.

La NRC lleva a cabo la actualización periódica y la mejora de las directrices de la ingeniería de factores humanos para mantener las herramientas de evaluación del diseño de los programas de factores humanos y los diseños de interfaz conforme al estado del arte, en plantas nuevas y modernizadas (Fleger y O'Hara, 2010; O'Hara et al., 2011; O'Hara, Brown, Higgins, et al., 2002). NUREG-0800, NUREG-0711 y NUREG-0700 se revisaron por última vez en 2007, 2012 y 2002,

⁸ Standard Review Plan es el término comúnmente empleado por el organismo regulador CSN de España.

respectivamente. Desde la última revisión, la NRC ha realizado investigación en ingeniería de factores humanos con el fin de proporcionar una base técnica sobre la que actualizar las guías de revisión. NUREG-0711 (O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012) ha sido el primero actualizado, revisión 3 y, a continuación, se introducirán los cambios pertinentes primero en NUREG-0700 y en NUREG-0800 con posterioridad (O'Hara, Higgins y Fleger, 2012).

Las publicaciones seriadas NUREG de la NRC son informes sobre las decisiones reguladoras, los resultados de proyectos de investigación, los resultados de investigaciones de incidentes y otra información técnica y administrativa. La documentación técnica emitida como documentos NUREG es elaborada por el personal de la NRC, mientras que los informes NUREG/CR contienen información técnica, reguladora o administrativa sobre programas o actividades de la NRC, que es preparado por un contratista.

A continuación se describe, de forma resumida, la estructura de los principales documentos de la normativa de U.S. NRC: NUREG-0800 (NRC, 2007), NUREG-0711 (O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012), NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) y NUREG-1764 (Higgins et al., 2007).

1.6.1.1 NUREG-0800: Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants

El *Standard Review Plan* (SRP), NUREG-0800 (NRC, 2007), se publicó originalmente en 1981 y se actualizó en 1996 (revisión 1) y en 2007 (revisión 2). Es aplicable a 10 CFR parte 50 y 52, proporcionando, por tanto, una metodología de revisión común para las plantas existentes y las plantas avanzadas; la revisión cubre el proceso de diseño y su producto. El capítulo 18 trata la ingeniería de factores humanos en las centrales nucleares. El objetivo de la revisión de la ingeniería de factores humanos es “mejorar la seguridad mediante la verificación de que las prácticas aceptadas y las guías de la ingeniería de los factores humanos se han incorporado en el programa de diseño de la planta” (NRC, 2007, capítulo 18, p. 1).

El SRP se estructura en las doce grandes áreas descritas a continuación en la tabla 1-1 y proporciona una serie de criterios generales de revisión para cada área. La metodología se adaptará a las necesidades de la revisión específica, seleccionando y enfatizando los aspectos adecuados de cada sección, es decir, en la revisión de una aplicación concreta no hay que realizar en detalle todos los pasos de la revisión listados en cada sección del SRP.

1.6.1.2 NUREG-0711: Human factors engineering program review model

Los programas de la ingeniería de los factores humanos de los solicitantes de permisos de construcción, licencias de operación, las certificaciones de diseño estándar, las licencias combinadas de operación y las modificaciones de licencia se evalúan utilizando los procedimientos de revisión de diseño detallado del NUREG-0711, revisión 3 (O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012). Esta evaluación programática verifica que las prácticas y las directrices aceptadas de ingeniería de factores humanos se incorporan en el proceso de diseño y en el diseño final, y en su implementación, para asegurar que el comportamiento y la fiabilidad del operador reciben el apoyo necesario a fin de proteger la salud y la seguridad del público.

El modelo de revisión del programa de la ingeniería de los factores humanos, NUREG-0711, fue publicado en 1994 (O'Hara, Higgins, et al., 1994), revisado en 2002 (O'Hara, Higgins, Persensky, Lewis y Bongarra, 2002), en 2004 (O'Hara, Higgins, Persensky, Lewis y Bongarra, 2004) y en 2012 (O'Hara, Higgins, Flegler y Pieringer, 2012). El NUREG-0711 (O'Hara, Higgins, Flegler y Pieringer, 2012) describe un modelo de revisión del programa de factores humanos, que permite evaluar la incorporación de los aspectos de factores humanos en el ciclo de vida del diseño. Descompone el proceso de revisión de un diseño en doce elementos. El desarrollo y la implementación del nuevo diseño está agrupado en cuatro etapas: la planificación y el análisis (elementos 1-6), el diseño (elementos 7-9), la verificación y validación (elemento 10) y la implantación y operación (elementos 11-12). Los doce elementos del programa y sus objetivos básicos se incluyen en la tabla 1-1. A su vez, cada uno de estos doce elementos está dividido en cinco secciones:

- Antecedentes: breve justificación del elemento.
- Objetivos: definición de los objetivos de la revisión del elemento.
- Productos e información a suministrar: descripción de la información a suministrar por los solicitantes para la aprobación de un diseño en relación con un elemento. En general, son dos tipos de informes: un plan de implementación (metodología propuesta) y un informe resumen de resultados.
- Criterios de revisión: criterios concretos de aceptación del diseño relacionados con un elemento del programa.
- Bibliografía: lista de documentos con información detallada sobre los aspectos de la ingeniería de los factores humanos a que se refiere el elemento.

Tabla 1-1. *Elementos del Modelo de Revisión del Programa de Factores Humanos del NUREG-0711 (O'Hara et al., 2012)*

Elementos del HFE PRM	Objetivos básicos de los elementos del programa del NUREG-0711
Elemento 1. Gestión del programa de ingeniería de factores humanos	Asegurar que el solicitante dispone de un equipo de diseño en ingeniería de los factores humanos (HFE) con la responsabilidad, autoridad, ubicación dentro de la organización y composición para garantizar que el diseño, en el ámbito de la ingeniería de factores humanos, puede alcanzar las metas deseadas.
Elemento 2. Revisión de experiencia operativa	Asegurar que el solicitante ha identificado y analizado los problemas de la ingeniería de factores humanos de otros diseños, que sean aplicables al diseño en la evaluación, de manera que se eviten, y que las características positivas identificadas en diseños previos sean tenidas en cuenta.
Elemento 3. Análisis de requisitos funcionales y asignación de funciones	Asegurar que el solicitante ha definido los requisitos funcionales de seguridad de la planta y que el reparto de tareas persona-sistema aprovecha ventajosamente las capacidades del ser humano y no le asigna funciones influidas negativamente por sus limitaciones.
Elemento 4. Análisis de tareas	Asegurar que el análisis de tareas realizado por el solicitante identifica las demandas o los requisitos del comportamiento humano que imponen las tareas asignadas al ser humano.
Elemento 5. Asignación de personal	Asegurar que el solicitante ha analizado los requisitos sobre el número y la cualificación del personal de una forma sistemática, que incluye la comprensión en profundidad de los requisitos de las tareas y los requisitos reguladores.
Elemento 6. Tratamiento de acciones humanas importantes	Asegurar que el solicitante ha identificado las acciones humanas importantes y que ha tenido en cuenta los mecanismos de error humano en las acciones importantes al diseñar los aspectos de ingeniería de factores humanos de la planta. Minimizar la probabilidad de error del personal y ayudar a asegurar que el personal puede detectar y recuperar cualquier error que ocurra.
Elemento 7. Diseño de la interfaz	Asegurar que el solicitante ha transferido adecuadamente los requisitos de las funciones y tareas al diseño de detalle de la interfaz persona-sistema, mediante la

Elementos del HFE PRM	Objetivos básicos de los elementos del programa del NUREG-0711
	aplicación sistemática de principios y criterios de la ingeniería de los factores humanos.
Elemento 8. Desarrollo de procedimientos	Asegurar que el programa de desarrollo de procedimientos del solicitante resultará en procedimientos que apoyen y guíen adecuadamente las interacciones del ser humano con los sistemas de la planta, controlen los incidentes y las actividades de la misma.
Elemento 9. Desarrollo del entrenamiento	Asegurar que el solicitante desarrolla un programa de entrenamiento del personal basado en un análisis sistemático del trabajo y de los requisitos de las tareas.
Elemento 10. Verificación y validación	Asegurar que el diseño suministra todas las alarmas, los indicadores y los controles para apoyar las tareas del personal de la planta, que el diseño se ajusta a los principios y guías de la ingeniería de los factores humanos, y que el diseño puede ser operado de manera efectiva por el personal de la planta.
Elemento 11. Implementación del diseño	Asegurar que la implementación en la planta de sistemas modernizados, interfaces, procedimientos y formación ha tenido en consideración sus efectos en la actuación del personal, además, proporciona el apoyo necesario para realizar las operaciones seguras, y asegurar que el diseño final implementado se ajusta fielmente al diseño verificado y validado.
Elemento 12. Monitorización de la actuación humana	Asegurar que el solicitante ha preparado una estrategia de monitorización de la actuación humana para que no se produzcan degradaciones debidas a los cambios que se realicen en la planta, y asegurar que las conclusiones obtenidas del proceso de evaluación siguen siendo válidas.

Para complementar los criterios de revisión o aceptación de los elementos del NUREG-0711 (O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012), la NRC ha emitido una serie de documentos como, por ejemplo, NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) para el elemento 7 y parte del elemento 10 (diseño de la interfaz y verificación del diseño) y NUREG/CR-6393 (O'Hara, Stubler, Higgins y Brown, 1997) para una parte del elemento 10 (validación del diseño).

1.6.1.3 NUREG-0700: Human-system interface design review guidelines

Como parte del proceso de revisión, las interfaces entre el personal de la planta y los sistemas y los componentes de la planta se evalúan de conformidad con las directrices de la ingeniería de los factores humanos recogidas en NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). Por tanto, sirve para revisar las aplicaciones de diseño de la interfaz persona-sistema para la licencia o la certificación del diseño de una central nuclear, así como para realizar revisiones del diseño de la interfaz en inspecciones u otras prácticas regulatorias, o en incidentes que impliquen actuación humana (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). Estas directrices se centran en las características físicas y funcionales de las interfaces, pero no cubren aspectos de instrumentación y control o de diseño estructural.

La NRC actualiza periódicamente el NUREG-0700 para asegurar que es una herramienta de revisión del diseño conforme al estado del arte y a la evolución de la tecnología instalada en las salas de control de las centrales nucleares. Las guías o directrices de la revisión del diseño de la interfaz persona-sistema del NUREG-0700 fueron editadas por primera vez en 1981 (NRC, 1981), siendo revisadas en 1996 (NRC, 1996) y 2002 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). La NRC se encuentra en el proceso de emitir la revisión 3 del NUREG-0700.

En la actualidad, el NUREG-0700 se puede emplear para diseñar y evaluar tanto sistemas convencionales como basados en ordenador (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b).

Inicialmente, el NUREG-0700 sólo consideraba guías o directrices relativas a sistemas anunciadores y otros aspectos de salas de control con tecnología tradicional, con instrumentación analógica y en panel, por lo que resultaba de valor limitado para revisar las salas de control avanzadas y las actualizaciones de salas basadas en tecnología digital (salas híbridas) (NRC, 1996). Geary, Mastromonico y Willoner (2005) compararon las modificaciones incorporadas en el NUREG-0700 en revisión 2 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) con respecto a la revisión 1 (NRC, 1996). El número de criterios aumentó de aproximadamente 1650 a 2200. Encontraron que 1600 criterios permanecieron iguales, aunque fueron reorganizados en algunos casos. Unos 100 criterios fueron reformulados, además de añadir 600 directrices y eliminar 70 directrices. En el capítulo de sistemas de alarma, 98 criterios permanecieron idénticos, 35 criterios fueron reformulados, se añadieron 14 criterios, formando un total de 147 criterios de sistemas de alarma en la revisión 2 del NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b).

Las guías están estructuradas en cuatro partes fundamentales –elementos básicos de la interfaz, sistemas de interfaces, diseño del lugar de trabajo y apoyo a la interfaz–, que a su vez se dividen en secciones, que se especifican en la tabla 1-2. Las directrices de alarmas están comprendidas en la parte II de sistemas.

Tabla 1-2. *Principales Partes y Secciones del NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b)*

Partes del NUREG-0700	Secciones del NUREG-0700 (revisión 2)
Parte I: Elementos básicos de HSI	<p>Pantallas de información. Proporciona guías para la revisión de las pantallas visuales (tales como formatos de pantallas, etiquetado, colores, símbolos, texto y actualización de datos).</p> <ul style="list-style-type: none"> – Interacción y gestión usuario-interfaz. Proporciona guías para la revisión de los modos de interacción entre el personal de planta y la interfaz (menús, navegación, mensajes del sistema, etc.) – Controles. Proporciona guías para la revisión de la información de entrada, tipos de diálogos y de controles, manipulación de información, tiempo de respuesta del sistema, e integración pantalla-control.
Parte II: Sistemas HSI	<p>Incluye guías sobre aspectos funcionales de los sistemas así como consideraciones específicas de las pantallas, la interacción usuario-sistema y los controles.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Sistema de alarma. Proporciona guías para revisar la implementación de diseño del sistema de alarma, cubriendo la selección de condiciones de alarmas, el procesamiento de alarmas, el filtrado y la supresión, la presentación de alarmas y los controles. – Sistema de funciones de seguridad y monitorización de parámetros. Proporciona guías para revisar las pantallas de funciones críticas de seguridad y los parámetros de seguridad. – Sistemas de pantallas empleadas por diverso personal de la planta, son pantallas de visualización grupal, por ejemplo, las pantallas de gran tamaño con información global. Proporciona guías para la revisión de sus características funcionales, la interacción usuario-sistema y las características físicas. – Sistemas de control por <i>software</i>, se proporcionan para controlar interfaces que vienen básicamente definidas por <i>software</i>, en vez de por conexiones físicas directas. Sirven, por ejemplo, para controlar bombas o la propia interfaz, como puede ser la selección de una pantalla. Son, entre otros, un teclado, un cursor y una pantalla táctil. – Sistemas de procedimientos computarizados. Proporciona guías para la revisión de procedimientos, incluyendo la representación de información, la capacidad funcional, la interacción de los usuarios con el sistema y la integración con otros elementos de la interfaz. – Sistemas de apoyo a la operación computarizados. Se proporcionan unas guías

Partes del NUREG-0700	Secciones del NUREG-0700 (revisión 2)
	generales para la revisión de las ayudas proporcionadas al personal para el análisis de la situación y la toma de decisiones, en aspectos como las características de las interfaces de usuario o las herramientas de simulación.
	– Sistema de comunicación. Se proporcionan guías para la revisión de la comunicación basada en habla (cara a cara, por teléfono, con altavoces, con micrófonos, etc.) y la comunicación basada en ordenador entre el personal de planta (empleados para la preparación, el envío y la recepción de mensajes).
Parte III: Diseño de las estaciones y del lugar de trabajo	– Diseño de estaciones de trabajo (consolas y paneles). Se proporcionan guías sobre el diseño de las características de las estaciones de trabajo, como la integración y disposición control-pantalla, etiquetado, etc. – Diseño del lugar de trabajo. Se proporcionan guías sobre consideraciones generales del lugar de trabajo, disposición general de las estaciones de trabajo y otros equipos, estaciones locales y características del entorno (temperatura, ventilación, iluminación y ruido).
Parte IV: Apoyo a HSI	– Mantenimiento de sistemas digitales. Se proporcionan guías para la revisión de aspectos relacionados con el mantenimiento de los sistemas digitales.

Las guías del NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) se presentan en un formato estandarizado, según la siguiente estructura:

- Número de la guía y título auto-descriptivo de la guía: identificación de la guía.
- Criterio de revisión: la característica de la interfaz servirá para juzgar la aceptabilidad de la interfaz que se está revisando. Los criterios no son un requisito, por lo que características discrepantes del criterio podrán ser consideradas como aceptables durante el proceso de revisión.
- Información adicional: con el objeto de ayudar a interpretar o a aplicar la guía proporciona clarificaciones, ejemplos, excepciones, figuras, tablas, etc.
- Fuente: documentos de referencia en los que se basa la guía.

Ejemplo de una guía:

4.2.2-3 Códigos de Prioridad de Alarmas

Se debe emplear un método de codificación de las señales visuales para los distintos niveles de prioridad.

Información adicional: Métodos aceptables de códigos de prioridad incluyen el color, la posición, la forma y los símbolos especiales. El color y la posición (de arriba a abajo) son métodos de codificación visuales especialmente efectivos. NUREG/CR-6105

1.6.1.4 NUREG-1764: Guidance for the review of changes to human actions

NUREG-1764 (Higgins et al., 2007) proporciona una guía para la revisión de las acciones humanas que implican cambios en las bases de licenciamiento de la planta.

1.6.2 Regulación de factores humanos en centrales nucleares de España

En España, el organismo regulador competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica es el Consejo de Seguridad Nuclear.

El 10 CFR 50 de los Estados Unidos es aplicable también a las centrales nucleares españolas. El 10 CFR 50 está dedicado a regular el licenciamiento de las centrales nucleares de Estados Unidos, contiene los requisitos exigibles a la mayor parte de los sistemas de seguridad de las centrales nucleares de agua ligera. Algunos apartados del 10 CFR 50 han formado parte de las bases de licencia de las centrales nucleares españolas desde el comienzo de su proceso de licenciamiento. Las

regulaciones emitidas por la NRC son ampliamente usadas por el CSN en sus evaluaciones, puesto que todas las centrales nucleares españolas son de tecnología estadounidense (Westinghouse o General Electric), excepto C. N. Trillo (cuya tecnología Siemens procede de Alemania). Por tanto, el adecuado seguimiento e implantación en las centrales nucleares españolas de la normativa sobre seguridad nuclear emitida en el país de origen del proyecto (de la tecnología) es un requisito de obligado cumplimiento por parte de los titulares y es, además, una pieza fundamental para garantizar que las centrales nucleares se exploten de forma segura y sin riesgos para la salud del público.

En España, el CSN tiene la facultad de emitir instrucciones, circulares y guías de carácter técnico relativas a las instalaciones nucleares y radiactivas y a las actividades relacionadas con la seguridad nuclear y la protección radiológica, según la Ley 33/2007 de 7 de noviembre de reforma de la Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear (BOE nº 268 de 8 de noviembre de 2007).

El CSN emite normativa de carácter obligatorio, que son las Instrucciones de Seguridad (IS), las Instrucciones Técnicas (IT) y las Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC) (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), n.d.). Las IS son normas técnicas en materia de seguridad nuclear y protección radiológica que tienen carácter vinculante para los sujetos afectados por su ámbito de aplicación, una vez han sido publicadas en el Boletín Oficial del Estado (BOE). En cuanto a su naturaleza legal, son verdaderos reglamentos con vocación de permanencia y pasan a integrarse en el ordenamiento jurídico, pudiendo ser objeto de revisión contencioso administrativo, como cualquier norma general. Su incumplimiento está tipificado como infracción administrativa. El CSN también emite normativa de carácter recomendatorio, por medio de Guías de Seguridad (GS), que son documentos técnicos de carácter no obligatorio para dirigir orientaciones, en la aplicación de la normativa vigente, en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. Al no ser de obligado cumplimiento, los usuarios pueden seguir métodos y soluciones diferentes a los contenidos de las mismas, siempre y cuando estén debidamente justificados (CSN, n.d.).

El capítulo 18 del *Standard Review Plan* y el modelo de revisión del programa de ingeniería de factores humanos, NUREG-0711 (O'Hara, Higgins, Fleger y Pieringer, 2012), constituyen una metodología adecuada para describir el proceso de incorporación de la ingeniería de factores humanos en las modificaciones de diseño en las salas de control de las centrales nucleares españolas (Gil, 2012). El CSN establece la necesidad de la incorporación de la ingeniería de factores humanos –requisitos de factores humanos– en las modificaciones de diseño de instalaciones nucleares en instrucciones de seguridad, entre las que destacan IS-21 sobre requisitos para las modificaciones en CCNN (CSN, 2009), IS-26 sobre requisitos básicos de seguridad nuclear aplicables a las instalaciones nucleares (CSN, 2010a), IS-27 sobre criterios generales de diseño de CCNN (CSN, 2010b) (Gil, 2012). No obstante, los procesos se venían implantando previamente a la emisión de esta normativa, al disponer de guías de seguridad, por ejemplo, la guía de seguridad 1.11 sobre modificaciones de diseño en centrales nucleares (CSN, 2002).

Destacar los siguientes aspectos de factores humanos contenidos en las instrucciones de seguridad del CSN:

- En la implantación de modificaciones permanentes “se incorporarán adecuadamente los métodos y criterios de factores humanos en todas las fases del proceso y actividades de las modificaciones” (CSN, 2009, p. 10).

- “El titular de la instalación deberá tener en cuenta los aspectos relacionados con los factores humanos durante el ciclo de vida de la misma, de manera que se mejore la seguridad de la explotación tanto en condiciones normales como en sucesos operacionales y en situaciones de accidente” (CSN, 2010a, pp. 9-10).
- “El titular de la instalación deberá prestar especial atención y disponer de programas específicos para reducir, detectar y corregir los errores humanos” (CSN, 2010a, p. 10).
- “Establecer los criterios generales que deben cumplirse en el diseño, fabricación, construcción, pruebas y funcionamiento general de las estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad de una central nuclear” (CSN, 2010b, p. 4).
- “El diseño de las ESC [estructuras, sistemas y componentes] importantes para la seguridad deberá tener en cuenta los principios y técnicas de ingeniería de factores humanos” (CSN, 2010b, p. 7).
- “El diseño de la sala de control tendrá en cuenta los factores humanos. La sala de control estará provista de dispositivos visuales, y en su caso, acústicos, que identifiquen los procesos y condiciones que se han desviado respecto a su condición normal y puedan afectar a la seguridad. El operador dispondrá de la información necesaria para poder comprobar la actuación y el efecto de las acciones automáticas” (CSN, 2010b, p. 11).

2 EL OPERADOR EN LA SALA DE CONTROL

En las centrales nucleares el control del proceso y por tanto, de todos los sistemas de la central, se realiza por el equipo de operación desde la sala de control. Las salas de control presentan a los operadores, a través de sus pantallas, ordenadores, paneles y diales, la situación de la central en cada momento. Los operadores trabajan por turnos, existiendo varios equipos de operación en cada planta que cubren las veinticuatro horas del día durante todo el año.

El operador desempeña un papel importante en el control de procesos contribuyendo a la aproximación de defensa en profundidad de la planta, cumpliendo una función vital para garantizar la operación segura de la instalación (Lin, Shiang, Chuang y Liou, 2014; O’Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a), incluso en sistemas con automatización (Hwang et al., 2008; O’Hara y Hall, 1992; Parasuraman y Wickens, 2008), sus acciones pueden tener un amplio impacto en la seguridad, por ejemplo, llegar a la causa raíz del problema y hacer frente a sucesos imprevistos (Dzwig, 2008). Los operadores continúan siendo fundamentales para asegurar el funcionamiento seguro y eficiente de las plantas industriales (Bransby, 1998b).

El equipo de operación puede estar constituido por un diferente tipo de personal con licencia, en función de la sala de control de los países de explotación y operación de la central nuclear, como se muestra en la tabla 2-1, que está adaptada de IAEA (2006). A modo de ejemplo en España, en la central nuclear de Almaraz, todos los equipos están formados por un jefe de turno con licencia de supervisor, común para las dos unidades de la central y, un supervisor, un operador de reactor y un operador de turbina por cada unidad.

Tabla 2-1. *Puestos de Trabajo en la Sala de Control (Adaptada de IAEA, 2006)*⁹

Country	Plant/Dual Unit Shift Supervisor	Unit Shift Supervisor	Deputy Shift Supervisor	Senior Reactor Operator	Control Room Operator	Reactor Operator	Turbine Operator	Special Positions
Brazil		x				x	x	SF ¹
Canada	x	x	x		x			
China	x	x	x			x	x	EO ²
Czech Rep.	x	x				x	x	CRP, SE, FP ³
France	x	x			x			SSS, SE, PIEP ⁴
Germany		x	x			x		
India	x		x		x			
Japan		x				x		
Korea		x				x		STA ⁵
Mexico		x	x			x	x	
Russia		x				x	x	SENPPUC ⁶
Spain	x	x			x	x	x	
Sweden		x				x	x	FO ⁷
Ukraine		x				x		RDSS, UO ⁸
USA	x	x		x		x		

¹Shift foreman ²Electrical operator ³Control room physicist, safety engineers, and fuel physicist

⁴Senior shift, safety engineers, and personnel involved in emergency plan ⁵Shift technical advisor

⁶Senior engineer on NPP unit control ⁷Field operator ⁸Reactor department shift supervisor, and unit operator

En España, el CSN ha emitido la guía de seguridad nº 1.1 (CSN, 1986) y la instrucción de seguridad IS-11 (CSN, 2007) para definir la formación académica, la experiencia y el entrenamiento mínimo aceptables para los aspirantes a licencias de operador o de supervisor de centrales nucleares y para los titulares de las mismas, a efectos de renovación. En las centrales españolas en explotación deben tener licencia de supervisor el jefe de turno de operación y el ayudante del jefe de turno (denominado también supervisor de sala de control). De igual modo, los operadores de reactor deben tener la licencia de operador.

El jefe de turno dirige el personal de operación que trabaje en su turno y controla el funcionamiento de la central, conforme a los procedimientos aprobados. Es responsable de evaluar, inicialmente, la naturaleza y magnitud de un incidente, en particular, de aquellos que puedan originar emisiones de radiactividad, así como de tomar las medidas para minimizar las consecuencias y garantizar la seguridad del personal, poniendo en marcha las actividades previstas por el plan de emergencia (CSN, 1986). El ayudante del jefe de turno, bajo la inmediata dirección del jefe de turno, controla el funcionamiento de la central conforme a los procedimientos aprobados y dirige al personal de operación que trabaje en su turno (CSN, 1986). El operador de reactor, bajo la inmediata dirección del ayudante del jefe de turno, es responsable de la manipulación de los mandos del reactor de conformidad con las instrucciones y procedimientos establecidos (CSN, 1986).

2.1 TIPOS DE TAREAS QUE DESEMPEÑA EL OPERADOR

En el desempeño de sus funciones y responsabilidades, los operadores de centrales nucleares realizan dos tipos de tareas: tareas primarias (controlar la planta) y tareas secundarias (interacción con

⁹ Se ha mantenido el idioma original del contenido de la tabla, con el objeto de evitar la distorsión en traducción, al considerar que no existe equivalencia para todos los puestos de trabajo.

la interfaz) (EPRI, 2003c; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000).

Las tareas primarias son la monitorización (supervisión) y el control de procesos (EPRI, 2003c; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a, 2002b). Las tareas primarias implican varias tareas genéricas cognitivas: la monitorización y la detección, el análisis de la situación, la planificación de la respuesta y la implementación de la respuesta (EPRI, 2003c; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000). Algunos ejemplos de tareas primarias, proporcionados por O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al. (2008), son la monitorización de los parámetros de la planta, el seguimiento de procedimientos, responder a las alarmas, arrancar bombas o alinear válvulas. La acción del operador realizada como respuesta a una alarma se considera una acción primaria, ya que modifica directamente alguna parte física de la planta, que afecta al proceso, como por ejemplo, poner en manual un controlador o arrancar una bomba (Rothenberg, 2009a).

Para realizar las tareas primarias en un sistema computarizado, los operadores llevan a cabo tareas secundarias al interactuar con la interfaz, esto es, las tareas secundarias son las que no están directamente relacionadas con las tareas primarias de monitorizar y controlar la planta (EPRI, 2003c; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000). En parte, estas tareas son necesarias por el hecho de que los operadores sólo pueden ver una cantidad limitada de información con simultaneidad en las pantallas, conocido también como el efecto *keyhole* (Braseth et al., 2009; Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain, 2008; EPRI, 2003e, 2003c; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; Roth et al., 1992; Salo et al., 2006; Vicente et al., 1997; Woods, 1995). Una clase de tarea secundaria es la gestión de la interfaz, que incluye la recuperación de información o la configuración de las pantallas de las estaciones de trabajo (EPRI, 2003c). Otras acciones secundarias comprenden la comunicación con otras personas, pensar sobre algo, anotar un suceso, o una condición o una situación (Rothenberg, 2009a).

S. J. Lee y Jung (2013), en un estudio en simulador PWR avanzado, encontraron una mayor porción de tareas secundarias, en particular la navegación en la pantalla, que de tareas primarias. Las demandas relacionadas con las tareas de gestión de la interfaz pueden resultar excesivas en determinadas circunstancias y, potencialmente, afectar a la seguridad de la planta (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a). Bajo condiciones de una elevada carga de trabajo, los operadores toman decisiones sobre cuándo cambiar de la tarea primaria a la secundaria y, viceversa, como parte de su estrategia de gestión de la carga (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). O'Hara, Brown, Lewis y Persensky (2002) hallaron, en condiciones de elevada carga de trabajo, evidencia de efectos negativos, la ejecución de la tarea primaria declinó, puesto que los operadores minimizaron la realización de tareas de gestión de la interfaz, dejando así de recuperar información potencialmente importante para sus tareas primarias. Lo atribuyeron a que las tareas primarias y secundarias a menudo demandan los mismos recursos cognitivos, de capacidad limitada, por lo que la realización de tareas de gestión de la interfaz requiere que los operadores desvíen la atención y el esfuerzo de sus tareas primarias (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Un ejemplo en cuanto al tipo de recursos cognitivos está en que ambas clases de tareas se basan en gran medida en la percepción visual del estímulo, el procesamiento de datos simbólicos y la manipulación manual de un conjunto limitado de dispositivos y formatos de entrada (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

2.2 ROL DEL OPERADOR EN FUNCIÓN DEL ESTADO DEL PROCESO

El rol del operador de una planta industrial abarca un gran número de actividades, incluyendo la operación de la planta, la optimización de la producción, la identificación de los fallos o la coordinación del mantenimiento (*Engineering Equipment and Materials Users Association* (EEMUA), 1999).

El personal de operación en una planta de energía nuclear debe asimilar y comprender grandes cantidades de información para el control de la planta, de una forma segura y eficaz (Davey, Guo, Russomanno, Popovic y Archer, 1992). Se ha producido un incremento significativo de la cantidad de información anunciada al personal de operación, debido a tres factores principales: 1) el aumento del tamaño y de la complejidad de las plantas de energía más modernas, 2) la aplicación de tecnologías basadas en ordenador para monitorizar el proceso y los equipos, que han aumentado la capacidad de adquisición, procesamiento y presentación de datos y, 3) la anunciación del cambio de estado de sensores, componentes y equipos individuales (Davey et al., 1992).

Conforme a EPRI (Seminara, Eckert, Seidenstein, Gonzalez y Stempson, 1980; Seminara et al., 1979), la tarea principal del operador consiste en mantener el conocimiento del estado y de los procesos de planta, por lo que el operador debe ser alertado de cambios menores y mayores en las condiciones de planta tan pronto se produzcan. Una vez obtenida su atención, debe disponer de los medios para determinar la naturaleza de las anomalías o condiciones temporales, diagnosticar los síntomas, asignar prioridad a la acción correctora y efectuar las acciones de control de recuperación. Más allá de esto, el operador debe confirmar la eficacia de sus acciones y restaurar el sistema de alerta a un estado que permita responder a los problemas posteriores (Seminara et al., 1979, 1980).

Boring y Persensky (2012), Persensky et al. (2010) consideran que los sistemas de alarma tienen un papel importante en las principales tareas de los operadores de centrales nucleares y, en función del diseño del sistema de alarma, el papel de los operadores podría ser la detección, la percepción, la monitorización, la toma de decisiones, la adopción de medidas, permitir la acción, o confirmar la acción.

Los operadores de centrales nucleares son responsables de la supervisión y la monitorización de la planta para detectar las anomalías, el diagnóstico de problemas cuando se producen y desarrollar un plan de compensación (Vicente y Burns, 1996). Una clasificación similar es descrita por S. J. Lee y Seong (2014), en donde los operadores de la sala de control desempeñan un rol de supervisión en la recopilación de información, la planificación y la toma de decisiones, que son actividades complejas y mentalmente exigentes. Por consiguiente, para que una sala de control sea eficaz debe apoyar a los operadores en: 1) la detección de los parámetros de la planta que indican un problema o cambio en el estado de la planta que requiere atención, 2) el diagnóstico del problema sobre la base de los indicadores y, 3) la toma de acciones correctivas en el momento oportuno (Lang, Roth, Bladh y Hine, 2002).

Los resultados de estudios empíricos de la Universidad de Chalmers (Gotemburgo, Suecia) muestran que dependiendo del modo de operación (por ejemplo, plena potencia, arranque y parada) y de la situación de trabajo (operación normal o anomalías), el papel del operador y el objetivo operacional cambia y, por consiguiente, las necesidades de información del operador (Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b, 2009). En funcionamiento a plena potencia los operadores tratan de optimizar

el proceso, mientras que en grandes anomalías los operadores garantizan la seguridad de la parada (Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009).

En la tabla 2-2 se resumen las tareas del operador en función del estado del proceso, siendo muy importante que esté claramente identificado el papel del operador para mantener la seguridad y la integridad de la planta en todos los estados operacionales (EEMUA, 1999).

Tabla 2-2. *Rol del Operador en Diferentes Estados de la Planta (EEMUA, 1999)*

Estado de la planta	Rol primario del operador	Información clave de alarma
Normal	Monitorización y optimización	Ajustes operativos menores
Anomalías	Gestión de la situación	Intervención del operador necesaria
Parada	Asegurar una parada segura	Acciones de seguridad necesarias

En situación de operación normal, los sistemas automáticos de control actuarán para mitigar las anomalías y mantener las condiciones de operación de la planta (EEMUA, 1999; Lees, 1983; Shahriari, Shee y Örtengren, 2006). El rol primario del operador es monitorizar la operación y realizar ajustes menores (regular la planta), tales como controlar los puntos de tarado o mantener el equipo en modo de control manual (EEMUA, 1999; Emigholz, 1996; Errington, DeMaere y Reising, 2004; Farbrot, Bye y Berg, 2000; Marshall y Baker, 1994). Las alarmas se emplean para llamar la atención del operador sobre los ajustes necesarios (EEMUA, 1999), pequeños ajustes operativos (Errington et al., 2004), teniendo que estar diseñadas de modo que no resulten molestas en otros estados operacionales (EEMUA, 1999). La mayoría de los funcionamientos incorrectos en las centrales nucleares son menores y fácilmente resolubles (Meister, 1995).

Si existen anomalías significativas en la planta, el sistema de control no puede, sin la intervención del operador, recuperar la situación (EEMUA, 1999). El operador es responsable del reconocimiento temprano y del diagnóstico de las condiciones de fallo, estando ayudado por el sistema de alarma en este aspecto crucial del rol del operador (Marshall y Baker, 1994). El operador tiene que determinar el estado de la planta y mitigar las consecuencias de la situación (Farbrot et al., 2000). En este caso, las alarmas servirán para anunciar la necesidad de la participación del operador (EEMUA, 1999).

Si el operador no corrige satisfactoriamente las anomalías, y la condición de planta se aproxima a un estado en donde es probable que se produzca daño o peligro, el sistema de emergencia intervendrá para detener el área afectada de la planta (EEMUA, 1999). El rol del operador se centrará en comprobar que se ha producido, de modo seguro, la parada automática y en tomar acciones complementarias para minimizar el tamaño de la anomalía (EEMUA, 1999; Errington et al., 2004; Shahriari et al., 2006). Si no se detiene la planta de modo seguro, o no existe un sistema de parada automático, el operador realizará las acciones para lograr el estado seguro de la planta (EEMUA, 1999; Mattiasson, 1999). Las alarmas informan de los fallos del sistema de parada o de otras situaciones no seguras que requieren la actuación del operador (EEMUA, 1999; Shahriari et al., 2006).

EEMUA (1999) expone que, durante situaciones anómalas, el rol del operador puede resultar muy complejo (figura 2-1). De acuerdo con EEMUA (1999), la respuesta del operador suele implicar distintos tipos de tareas, normalmente se requieren tareas independientes y algunas en paralelo. Cada tarea suele a su vez implicar una serie de sub-tareas, que han de ser coordinadas, para corregir eficientemente la situación anómala, frecuentemente el operador trabajará bajo presiones de tiempo y estrés.

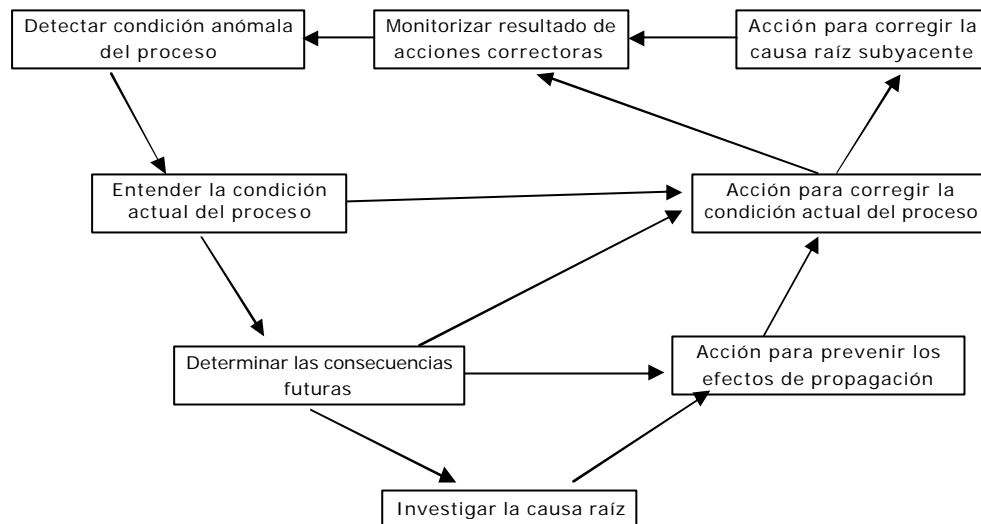


Figura 2-1. Respuesta del operador a una situación anómala (EEMUA, 1999).

Desde el punto de vista de la ingeniería cognitiva de sistemas, las alarmas constituyen una fuente rica de información que puede emplearse en todas las fases de respuesta a una anomalía, por lo que, las alarmas proporcionan información que facilita que el operador mantenga el control del proceso y poder actuar tanto de modo proactivo –la expectativa de que se produzca una alarma puede llevar al operador a un estado de preparación o disposición para actuar o reaccionar de una manera específica– como reactivo (Niwa y Hollnagel, 2001).

Hoonhout y Zwaga (1993), Zwaga y Hoonhout (1994) sostienen que los operadores adaptan la monitorización a la complejidad¹⁰ y condición del proceso. Llevan a cabo sus tareas conforme al principio de *gestión por conciencia*¹¹, los operadores monitorizan continuamente variables clave, por lo que se mantienen conscientes del estado del proceso y pueden predecir, hasta cierto punto, el comportamiento del proceso en un futuro cercano, logrando así un elevado estado de preparación frente a posibles cambios en el proceso. Los operadores consideran que su tarea principal es *prevenir* las alarmas, en lugar de *reaccionar* a las alarmas. En el enfoque de *gestión por excepción* en la supervisión del proceso, el operador inicia una acción ante la activación de una excepción, normalmente una alarma para la anomalía. Cuando el proceso está estable, los operadores se basan más en la gestión por conciencia, empleando la gestión por excepción en estados de transición (Fiset, 2009). Puesto que los operadores emplean ambos comportamientos, en el diseño de la interfaz éstos tienen que estar contemplados, de forma que siempre estén presentes los indicadores que apoyan la gestión por excepción, mientras que aquellos que apoyan la gestión por conciencia deben estar disponibles a solicitud del operador (Fiset, 2009).

Por último, las investigaciones llevadas a cabo por el profesor D. Woods del Instituto de Ergonomía de la Universidad del Estado de Ohio sobre la gestión dinámica de fallos, en los dominios de aviación comercial, sistemas espaciales, anestesia en cirugía y control de procesos, encontraron que

¹⁰ La variable principal que afecta el rendimiento del operador es la complejidad de un problema, que se define en términos del número de fallos concurrentes y las interacciones entre componentes de planta (Meister, 1995).

¹¹ Para Hoonhout y Zwaga (1993), los fabricantes a menudo consideran el papel de los operadores en la supervisión del proceso, como un *gestor de las crisis*, en donde la tarea principal del operador está en la gestión del proceso, el diagnóstico y la corrección de fallos, conforme a la aproximación de gestión por excepción. Jervis (1984) considera que es práctica habitual adoptar una forma de *control por excepción*.

una de las características de la gestión dinámica de fallos es la cascada de anomalías que se derivan de un fallo y que pueden producir incluso una mayor cascada de mensajes de bajo nivel sobre anomalías potenciales (Woods, 1994, 1995). Como consecuencia provocan múltiples actividades cognitivas altamente interconectadas, como el razonamiento de abducción, el cual requiere el reconocimiento de las anomalías, la generación de hipótesis y la intervención de diagnóstico: el compromiso de los cursos de acción en un contexto de incertidumbre y de riesgo, acciones de autoprotección para preservar la integridad del sistema, la monitorización del éxito de las intervenciones y volver a planificar para afrontar obstáculos y condiciones novedosas (Watss, Woods y Patterson, 1996; Woods, 1994).

2.3 CAPACIDADES Y LIMITACIONES DEL SER HUMANO

El ser humano es capaz de hacer frente a situaciones imprevistas para analizar y crear soluciones con el objeto de terminar o mitigar las secuencias de eventos adversos. Sin acciones humanas, muchos incidentes podrían haber provocado accidentes. El comportamiento seguro no es sólo la ausencia de errores, sino también las contribuciones humanas positivas a la seguridad en forma de prevención, detección y mitigación (*Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, Committee on Nuclear Regulatory Activities* (OECD, NEA, CNRA), 2004).

La integración de los factores humanos y organizativos en el proceso de modificación del diseño, desde las etapas iniciales, de tal manera que las capacidades y limitaciones humanas estén adecuadamente consideradas, conduce, entre otros, a los siguientes beneficios (OECD, NEA, CSNI, 2009a):

- Reducir la probabilidad de posibles errores humanos.
- Mejorar la conciencia y apoyar a los usuarios finales.
- Reducir los requisitos de nuevas medidas correctoras.
- Mejorar la fiabilidad del sistema.

La anunciación debe ofrecer al operador la información pertinente de manera comprensible, concisa y *sensible al contexto*¹², para apoyar las capacidades y las limitaciones del procesamiento humano de información y de toma de decisiones (Davey, Feher y Guo, 1995). Las alarmas son necesarias para apoyar las tareas de control de la planta que realiza el equipo de operación en la sala de control, teniendo que ser consideradas, en el diseño del sistema de alarma, las capacidades y las limitaciones del ser humano.

A continuación se presenta, en primer lugar, las capacidades del operador¹³, en segundo lugar, las limitaciones del ser humano¹⁴ y, en tercer lugar, medidas de tasa de anunciación del sistema de alarma en relación con las características del operador.

¹² Todas las técnicas para hacer frente a la sobrecarga de datos deben tratar la sensibilidad al contexto (Woods et al., 2002).

¹³ Card, Moran y Newell (1986) describen el modelo del procesador humano que fue desarrollado como una forma de resumir décadas de investigación de la psicología en un modelo de ingeniería. Presentan las habilidades cognitivas del ser humano, proporcionando parámetros numéricos.

¹⁴ Wickens y Kramer (1985) revisaron el estado del arte en cuanto a los límites del comportamiento humano desde la aproximación de la psicología de la ingeniería.

2.3.1 Capacidades del operador

Por el lado de las ventajas, el cerebro humano tiene fuertes capacidades de reconocimiento de patrones y asociativas, que son muy flexibles y se pueden adaptar a las situaciones laborales. Así mismo, el operador muestrea, en lugar de explorar por completo, la información de alarma (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Durante las primeras fases de una anomalía, los operadores supervisan parámetros importantes en la planta para establecer una visión general del estado de la planta (Sørenssen et al., 2002). El sistema de procesamiento de información del operador intenta manejar situaciones con una elevada carga de trabajo de una forma heurística (Hollywell y Marshall, 1994; O'Hara, 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Stanton, Harrison, Taylor-Burge y Porter, 2000). Los heurísticos (o reglas de acción simplificadoras) proporcionan ayuda ("atajos") al procesamiento de información (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; O'Hara, Higgins, Stubler y Kramer, 2000), se desarrollan a partir de la experiencia y del ensayo y error, en vez de realizar un análisis sistemático y formal (O'Hara, Higgins, Stubler y Kramer, 2000). Los heurísticos reducen la carga total en el sistema de procesamiento de información, pero también pueden conducir a error humano (O'Hara, 1994; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Por ejemplo, los recursos de atención se pueden utilizar de una manera más eficiente mediante la combinación mental de indicaciones individuales en grupos relacionados, utilizando el heurístico de estrategias de agrupamiento (*chunks*) de información (Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000).

Thunberg y Osvalder (2007b, 2009) destacan la relevancia de diseñar un sistema de alarma que se adapte a las funciones del operador en cada modo de operación, puesto que influirá en el procesamiento de la información. Diseñar el sistema para apoyar el modelo mental del operador y la conciencia de la situación del proceso (Alm y Osvalder, 2011; Osvalder y Alm, 2011). Un sistema de alarma que ha sido diseñado para los diferentes modos de planta y las necesidades cambiantes del operador ayuda a detectar los problemas del proceso y a priorizar la respuesta del operador (Errington et al., 2004). Del mismo modo, Crowe (2002), Davey et al. (1992), Farbroth et al. (2000), O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) y Persensky et al. (2010) proponen un diseño del sistema de alarma centrado en el operador, teniendo en cuenta los aspectos del procesamiento de información y la amplia cantidad de información de alarmas que se presenta en la sala de control de una central nuclear. Farbroth et al. (2000) postulan el requisito de diseñar el sistema de alarma centrado en el operador, adoptando una aproximación de abajo a arriba, tomando las tareas del operador como punto de partida, considerando los diferentes estados de la planta, e integrando las alarmas en los formatos del proceso y en las pantallas generales.

2.3.2 Limitaciones del operador

Health and Safety Executive (HSE, 2000), para identificar si el sistema de alarma está diseñado conforme a un estándar que considere las limitaciones humanas, recalca que un sistema eficaz debería dirigir la atención del operador a condiciones de planta que requieran una evaluación o acción oportuna. Consiguientemente, tendría que:

- Alertar, informar y orientar a los operadores, para diagnosticar los problemas y mantener el proceso en estado seguro.
- Evitar paradas de emergencia innecesarias.
- Presentar al operador sólo las alarmas útiles y relevantes.
- Emplear la priorización para resaltar las alarmas críticas.

- Disponer de una respuesta definida para cada alarma.
- Tener un diseño ergonómico para satisfacer las necesidades y las capacidades del usuario.
- Permitir el tiempo suficiente para la respuesta del operador.

El diseño del sistema de alarma no excederá las capacidades perceptivas y cognitivas del operador (Bransby, 1998b; Bransby y Jenkinson, 1998a; Brown et al., 2000; Bye y Moum, 1996; *Norwegian Petroleum Directorate* (NPD), 2001). La interfaz tiene que considerar explícitamente los requisitos y las limitaciones humanas (Brazier, 2010; NAMUR, 2008). Las limitaciones son principalmente en áreas como la memoria de trabajo (capacidad limitada y de corta duración) (Brown et al., 2000; Bye y Moum, 1996; NPD, 2001; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000; Xiao y Seagull, 1999), la memoria a largo plazo (NPD, 2001; Xiao y Seagull, 1999), la capacidad de la carga de trabajo (Bransby y Jenkinson, 1998a; Bye y Moum, 1996; EEMUA, 1999) y la disponibilidad limitada de recursos de procesamiento atencional (Bransby y Jenkinson, 1997, 1998a; Brown et al., 2000; Fickelscherer y Chester, 2013; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000; Xiao y Seagull, 1999). Esto ha llevado a Hartley, Yaraskavitch y Davey (1998) y Long y Davey (1996) a incluir al nivel de requisitos funcionales del sistema de alarma, en la función de alertar, las limitaciones cognitivas relacionadas con la atención (descrito posteriormente).

Bransby y Jenkinson (1997, 1998a) indican que el sistema de alarma ayuda al operador a gestionar su tiempo, no puede dirigir la atención del operador a información del estado de la planta continuamente, ya que le distraería de actividades importantes relacionadas con la evaluación de la seguridad de la planta y mantener la planta bajo control. Incluso cuando la alarma ha sido activada y detectada, se crea una tarea adicional al llevar a cabo la respuesta, influyendo en la tarea de monitorización (Niwa y Hollnagel, 2001). Además, puesto que el rol del operador implica diferentes actividades y responsabilidades, el tiempo requerido para realizar otras actividades puede imponer limitaciones a la carga de tratamiento y tasa de alarmas aceptable, lo que tendrá implicaciones en el diseño del sistema de alarma (EEMUA, 1999). Si el sistema de alarma muestra una gran cantidad de alarmas activas, referido comúnmente en la literatura como *avalancha de alarmas* o *inundación de alarmas*, con una tasa de presentación que el operador no puede asimilar (comprender o responder a), entonces falla en su objetivo fundamental de gestionar la atención del operador (Bransby y Jenkinson, 1998a; Fickelscherer y Chester, 2013; Lees, 1983), evita que el operador determine la causa raíz de la anomalía del proceso y, por lo tanto, limita la posibilidad de una respuesta efectiva y rápida (Koene y Vedam, 2002; Kondaveeti, Izadi, Shah, Black y Chen, 2012; Kondaveeti, Izadi, Shah, Shook, Kadali y Chend, 2013).

La avalancha de alarmas, que requiere la atención del operador en una situación accidental, puede originar una condición de carga mental (sobrecarga cognitiva) e influir en la conciencia de la situación de los operadores, es decir, dificultar el entendimiento de qué es lo que está pasando y de cuál es la situación real del proceso (la causa raíz del problema). La existencia de sobrecarga cognitiva implica que un conjunto de tareas demanda más recursos mentales de los disponibles por el operador, es decir, en situaciones complejas con alarmas, la información presentada al operador puede exceder su capacidad mental. La consecuencia es que información vital sobre el proceso puede no ser detectada, percibida, comprendida o procesada por los operadores, por lo que éstos pueden realizar un análisis erróneo de la situación y, por tanto, ejecutar respuestas incorrectas (errores de comisión) o fallar al responder ante anomalías o emergencias (errores de omisión).

En especial, la detección de un segundo suceso suele resultar especialmente problemática (S. Baker, Gertman, Hollnagel, Holmstrom, Marshall y Øwre, 1985; S. Baker, Hollnagel, Marshall y Øwre, 1985; Fujita et al., 1988; Marshall, Reiersen y Øwre, 1987; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; O'Hara, Wachtel y Persensky, 1995; Reiersen, Marshall y Baker, 1987). Pudiendo ser el resultado de las estrategias de solución de problemas del operador (O'Hara, 1994; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Reason, 1990): 1) la exploración se inicia por las señales del sistema de alarma y el operador divide la atención entre una variedad de actividades de recopilación de datos; 2) el operador se centra en un grupo específico de indicadores y hace un diagnóstico inicial; 3) los recursos de atención del operador buscan datos que confirmen la hipótesis; 4) el operador se focaliza en la hipótesis y puede no darse cuenta de cambios en el estado de la planta. La conciencia del operador sobre nuevos fallos se ve obstaculizada por la escasez de recursos de procesamiento de la información.

Moray y Rotenberg (1989) encuentran evidencia experimental, empleando datos de seguimiento de movimientos oculares en una tarea industrial, del fenómeno denominado *cognitive tunnel vision* (Moray, 1981; Sheridan, 1981) o *cognitive lock-up* (Moray y Rotenberg, 1989). Es el fallo en detectar o diagnosticar una situación anómala debido a ignorar información que está disponible, concentrándose en algunas variables, con exclusión de las demás (Moray, 1981; Moray y Rotenberg, 1989), lo que puede ser debido a las hipótesis que se forman sobre el fallo (Moray y Rotenberg, 1989). Los participantes centraron su atención en el primer fallo, a expensas de los fallos posteriores; los operadores estaban ocupados con un fallo y optaron por terminar ese problema antes de pasar a uno nuevo, esto es, los operadores prefieren tratar los fallos en serie, en vez de afrontar fallos de forma concurrente (Moray y Rotenberg, 1989).

2.3.2.1 Mecanismos de error humano

El error, de omisión o de comisión, no es aleatorio, es el resultado de características básicas y limitaciones del sistema humano del procesamiento de la información que, bajo determinadas circunstancias, lleva a predisposición al error, puesto que se alteran las estrategias de procesamiento de la información (O'Hara, 1994). Como sostienen O'Hara (1994) y O'Hara, Brown, Lewis y Persensky (2002), basándose en los resultados de Norman (1981, 1983), Rasmussen (1986) y Reason, (1990), los errores humanos se pueden explicar por un número relativamente pequeño de mecanismos cognitivos. Los mecanismos de error se relacionan con la respuesta del procesador humano a factores que incluyen situaciones no familiares, alta carga de trabajo, e interrupción de las actividades en realización. Bajo dichas circunstancias, los operadores emplean heurísticos para afrontar las demandas (O'Hara, 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a). El diseño de la interfaz debería apoyar el empleo de los recursos de procesamiento cognitivo y ayudar a prevenir los errores iniciados por heurísticos (O'Hara, 1994).

A continuación se describe brevemente la aproximación de los primeros autores que trataron los mecanismos de error humano, en la década de los ochenta: Norman, Rasmussen y Reason. Sus aproximaciones siguen siendo relevantes en la actualidad.

Norman (1981, 1983) distingue entre *slips* (la intención es correcta, pero se falla al realizar las actividades necesarias) y *mistakes* (la intención es incorrecta, lo que lleva a una acción errónea). Clasifica los errores humanos en tres categorías, en función de los mecanismos cognitivos implicados: errores de descripción, errores de activación y errores de captura. Norman (1983) argumenta que, al

analizar las clases de errores que las personas realizan en los sistemas, es posible desarrollar principios de diseño del sistema que minimicen tanto la ocurrencia del error como sus efectos.

El marco del comportamiento basado en destreza, regla y conocimiento (*Skill, Rule, Knowledge* - SRK) de Rasmussen (1983) distingue tres niveles de actuación relativos a la familiaridad de la tarea, se refieren al grado de control consciente ejercido por el operador en su actividad. El modo basado en destreza se refiere a la realización de acciones físicas altamente entrenadas, que se llevan a cabo sin control consciente, y que requieren poco esfuerzo. El modo basado en regla implica el uso de reglas que pueden haberse aprendido como resultado de interactuar con la planta, a través de entrenamiento formal, o trabajando con operadores experimentados. En el modo basado en conocimiento, el operador realiza la tarea de forma casi completamente consciente, el operador necesita realizar un esfuerzo mental considerable para evaluar la situación. Este marco de SRK es útil para identificar los tipos más probables de error en diferentes situaciones operativas, o dentro de los diferentes aspectos de la misma tarea en donde pueden existir diferentes demandas de procesamiento de información. Rasmussen (1986) y Rasmussen y Vicente (1989) definen cuatro categorías de error y su importancia en el diseño del sistema, basándose en los mecanismos de control cognitivo: errores asociados a mecanismos de aprendizaje humano que reflejan la adaptación del operador al sistema, errores relacionados con la interferencia entre estructuras de control cognitivo que compiten, errores relativos a la falta de recursos de procesamiento y errores resultantes de la variabilidad intrínseca humana. Rasmussen (1986) desarrolla el modelo de escalera, que comprende ocho etapas de toma de decisiones: activación, observación, identificación, interpretación, evaluación, definición de la tarea, formulación de procedimientos y ejecución. El marco SRK se emplea actualmente para analizar el comportamiento humano en centrales nucleares (Licao et al., 2014; Lin et al., 2014; Pengcheng, Li, Guohua y Licao, 2010), así como en otros dominios (Besnard y Greathead, 2003; Hobbs y Williamson, 2002; Marcus, 2006; Wentink, Stassen, Alwayn, Hosman y Stassen, 2003).

Rouse y Rouse (1983) presentan una metodología de clasificación y análisis de errores, que considera los errores en las diferentes etapas del procesamiento de la información, atribuyendo diferentes causas en cada etapa.

Reason (1987, 1988 citado en O'Hara, 1994; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a) presenta un modelo de error humano bien definido, que incluye la mayoría del trabajo de Norman y Rasmussen. Reason (1990) desarrolló un marco de clasificación de errores humanos en equivocaciones (*slips*), fallos de memoria (*lapses*), errores en la formación de la intención (*mistakes*) y violaciones (*violations*). En el modelo de Reason (1990), las equivocaciones y los fallos de memoria son errores al llevar a cabo las intenciones en la implementación de la respuesta, es decir, la persona intenta realizar una cosa pero hace otra. Los errores en la formación de la intención están relacionados con el incorrecto análisis de la situación y con la planificación inadecuada de la respuesta. Las violaciones son desviaciones de las acciones de los procedimientos de operación.

El modelo *Generic Error Modelling System* (GEMS) de Reason (1990), una extensión de la aproximación de Rasmussen (1983), basa su clasificación de error en las definiciones de equivocaciones y fallos de memoria basados en destreza y, también, errores en la formación de la intención basados en reglas y en conocimiento. El operador de la central nuclear es confrontado con una configuración dinámica, múltiple y compleja, es decir, una situación donde la configuración cambia como resultado de las acciones del operador y las acciones del sistema. GEMS describe el paso de un tipo de procesamiento de información a otro, sirve para explicar los errores de actuación.

Proporciona valiosa información sobre mecanismos y causas subyacentes a errores humanos (modos de fallo) y presenta una taxonomía de tipos de error que ayuda en la predicción y la detección de las clases de error, además, puede emplearse para su prevención y para proporcionar mecanismos de recuperación. Posteriormente, Reason (1997) desarrolla el modelo de causación de accidentes, basándose en el modelo de defensa en capas (fallos activos y condiciones latentes).

Por otra parte, en el ámbito nuclear, el error humano tiene una especial significación debido a su incorporación y cuantificación en el Análisis de Fiabilidad Humana (HRA)¹⁵ de los modelos de Análisis Probabilista de Seguridad (APS). El error humano es uno de los indicadores del comportamiento, junto con otras medidas como el tiempo, la exactitud o la carga (O'Hara y Hall, 1992).

Para cerrar este apartado, con el objeto de compensar potenciales deficiencias en las tareas de vigilancia humana y permitir a los operadores emplear más tiempo en la interpretación de la situación, se introduce el procesamiento de alarmas con estrategias de filtrado, de supresión y de priorización de alarmas, en donde el sistema de alarma filtra la información del estado de la planta para mostrarla al operador en función del contexto (entre otros, Alm y Osvalder, 2011; Bransby y Jenkinson, 1998a, 1998b, 1998c; Davey et al., 1995; EEMUA, 1999; EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Errington et al., 2004; Lees, 1983; NPD, 2001; Roth et al., 1998; Stanton, 1992, 1994b, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Vicente et al., 1997; Woods, O'Brien y Hanes, 1987).

2.3.3 Tasa media de alarmas y su relación con el operador

Un operador sólo puede asimilar información y llevar a cabo las acciones a una determinada tasa de información (entre otros, Bransby y Jenkinson, 1998a; Brown et al., 2000; Buddaraju, Harvey y Knapp, 2011; EEMUA, 1999; Errington et al., 2004; Hewitt y Andow, 2009; Hollywell y Marshall, 1994; Kondaveeti et al., 2013; Reising, Downs y Bayn, 2004; Reising y Montgomery, 2005; Strobhar y Harvey, 2011). Consiguientemente, la tasa de presentación de alarmas debe cumplir con aquello que los operadores son capaces de afrontar.

En condiciones experimentales de laboratorio, Hollywell y Marshall (1994) estudiaron la tasa de mensajes de texto de alarmas, presentadas en listas de alarmas en Pantalla de Visualización de Datos (PVD), que los operadores de centrales nucleares pueden leer e identificar. Participaron cuarenta operadores de sala de control de tres estaciones de reactores AGR (*Gas Cooled Reactor*) del Reino Unido. Los resultados mostraron que la tasa máxima, que un operador entrenado puede leer y entender de mensajes de texto, familiares y estructurados, es alrededor de 30 mensajes por minuto (Hollywell y Marshall, 1994). Sin embargo, en el estudio los operadores preferían tasas de 15 mensajes por minuto o inferiores. Hay que destacar que los operadores no tenían que realizar otras tareas adicionales en el experimento (como puede ser una posible respuesta del operador como consecuencia de la alarma).

Esto lleva, por ejemplo, a Bransby y Jenkinson (1998a) a considerar que en planta la tasa de lectura podría ser bastante menor, puesto que el operador tendrá que evaluar las implicaciones de cada mensaje de alarma, comprobar la información relevante de la planta y tomar las acciones de respuesta. El estudio de Hollywell y Marshall (1994) también encontró que la degradación de la actuación no se

¹⁵ Pocos años después del accidente en la unidad de 2 de la central nuclear de *Three Mile Island* (TMI-2) se requirió la realización del HRA para identificar y predecir los errores humanos en sistemas complejos.

manifestaba en la exactitud o en el tiempo de respuesta, en cambio se producía el incremento de alarmas no detectadas cuando se superaba la tasa máxima de presentación de alarmas.

EEMUA (1999) proporciona directrices que son empleadas en la mayor parte de los proyectos industriales de sistemas de alarma. Dada la relevancia de las medidas definidas por EEMUA (1999) se incluyen a continuación. En primer lugar, estimaciones para la evaluación de la tasa media de alarmas en operación estable (tabla 2-3), la tasa de alarmas ante anomalías (tabla 2-4) y la distribución de alarmas por prioridades (tabla 2-5). Constituyen los indicadores clave del rendimiento del sistema de alarma.

La tabla 2-3 proporciona medidas promedio en operación estable, aconsejando como nivel aceptable una alarma en períodos de 10 minutos.

Tabla 2-3. *Evaluación de la Tasa Media de Alarmas (EEMUA, 1999)*

Tasa media de alarma a largo plazo en operación	Aceptabilidad
<ul style="list-style-type: none"> • Más de 1 alarma por minuto • Una alarma en dos minutos • Una alarma en 5 minutos • Menos de una alarma en 10 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy probablemente inaceptable • Es probable que exista exceso de demanda • Manejable • Muy probablemente aceptable

La tabla 2-4 proporciona una guía general, basándose en la experiencia, sobre la aceptabilidad de las tasas de alarma en los 10 primeros minutos después de una anomalía. Los resultados expuestos a continuación de Reising et al. (2004) apoyan la directriz de EEMUA (1999) de no más de 10 alarmas en los primeros diez minutos tras la anomalía.

Tabla 2-4. *Guía Sobre la Tasa de Alarmas Tras una Anomalía (EEMUA, 1999)*

Número de alarmas mostradas los 10 primeros minutos siguientes a una anomalía principal	Aceptabilidad
<ul style="list-style-type: none"> • Más de 100 alarmas • De 20 a 100 alarmas • Por debajo de 10 alarmas 	<ul style="list-style-type: none"> • Definitivamente excesivo y muy probable que lleve al operador a abandonar el uso del sistema • Difícil de afrontar • Debería ser manejable, pero difícil si varias de las alarmas requieren una respuesta compleja del operador

La tabla 2-5 presenta la distribución recomendada de las alarmas en función de su prioridad.

Tabla 2-5. *Distribución de Alarmas por Prioridad (EEMUA, 1999)*

Prioridad	Alarmas configuradas durante el diseño del sistema
<ul style="list-style-type: none"> • Crítica • Alta • Media • Baja 	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximadamente 20 en total • 5% del total • 15% del total • 80% del total

Esta directriz es altamente relevante, puesto que la reducción del número de alarmas por sí sola no es garantía de una operación eficiente; el objetivo principal es asegurar que el sistema mostrará las alarmas más importantes en primer lugar, incluso ante una gran cantidad de alarmas (EPRI, 2006). Cuando los sistemas no tienen esta característica, los diseñadores siempre desean reducir significativamente el número de alarmas (EPRI, 2006). Esto es, lo importante de las medidas no es sólo la capacidad de los operadores para responder a las alarmas, sino también que los operadores atiendan a la importancia de la alarma (EPRI, 2004a; Koene y Vedam, 2000; NPD, 2001). Cuanto

mayor sea el número de alarmas de alta prioridad en comparación con alarmas de baja prioridad, el operador no considerará la prioridad de la alarma y tratará todas con el mismo nivel de atención, anulando así una característica clave del sistema de alarma (Koene y Vedam, 2000).

En la tabla 2-6 se presentan medidas de activación de alarmas de EEMUA (1999) en comparación con estadísticas de alarma en treinta y nueve plantas de diversas industrias realizada por Matrikon (Rothenberg, 2009, p. 121). Se observa que la tasa de activación de alarmas en la industria es muy superior a la recomendación estándar durante operación normal.

Tabla 2-6. *Medidas de Alarmas Anunciadas Proporcionadas por EEMUA en Comparación con las Medidas de Matrikon Inc (Rothenberg, 2009)*

Tasa de Alarma	EEMUA	Petróleo y Gas	Petroquímica	Energía	Otros
Promedio de alarmas por día	144	1200	1500	2000	900
Promedio de alarmas permanentes	9	50	100	65	35
Máximo de alarmas en 10 minutos	10	220	180	350	180
Promedio de alarmas/intervalo 10 min	1	6	9	8	5
Distribución % (Baja/Media/Alta)	80/15/5	25/40/35	25/40/35	25/40/35	25/40/35

El Consorcio de Gestión de Situaciones de Anomalías (*Abnormal Situation Management*), en adelante Consorcio ASM, llevó a cabo proyectos de investigación de factores humanos relacionados con las medidas del rendimiento del sistema de alarma, en concreto con respecto a las directrices de EEMUA (1999) sobre la activación de una alarma en 10 minutos durante operación normal y de no más de 10 alarmas en 10 minutos anunciadas en condiciones anómalas. Las recomendaciones recogidas en EEMUA (1999) sobre la tasa promedio del sistema de alarma estaban basadas en la experiencia profesional, no en teoría básica de actuación humana. Se centraron en analizar cuál sería la tasa razonable de alarmas para una respuesta fiable de los operadores, teniendo en cuenta las limitaciones de la actuación humana, en refinerías y plantas petroquímicas. En el estudio grabaron a cinco operadores de tres plantas en cinco escenarios en un simulador de formación. Los resultados del estudio mostraron que las medidas de EEMUA 191 (EEMUA, 1999) eran pertinentes desde el punto de vista de carga del operador (Reising et al., 2004). Un estudio posterior sobre prácticas efectivas de gestión de alarmas, también para refinerías e industria petroquímica, amplió el análisis de las recomendaciones proporcionadas por EEMUA 191 (Errington et al., 2004; Reising y Montgomery, 2005). Los resultados obtenidos en 37 consolas de operación indicaron que la recomendación sobre la tasa promedio de alarmas se puede alcanzar durante operación normal. Alrededor de un tercio de las consolas fueron capaces de lograr la directriz sobre la frecuencia de alarmas recomendada para operación normal y, aproximadamente, una cuarta parte de las consolas lograron el nivel manejable (de 1 a 2 alarmas en un período de 10 minutos). Sin embargo, la recomendación para la tasa máxima de alarmas después de anomalías parece ser un reto, ninguna de las plantas en funcionamiento alcanzó los valores, sólo 2 de las 37 consolas estuvieron cerca de lograr los valores promedio de rendimiento. Les llevó a concluir que no existe una “bala de plata”, en el sentido de un único factor, para alcanzar las recomendaciones de rendimiento del sistema proporcionadas por EEMUA 191 (EEMUA, 1999). El problema más difícil de solucionar está en el número de alarmas en los primeros 10 minutos después de suceder la anomalía, esto es, la avalancha de alarmas, puesto que encontraron más de 100 alarmas en períodos de 10 minutos, al menos una vez, en un 60% de las consolas (Hewitt y Andow, 2009).

Para evaluar el impacto de la tasa de presentación de alarmas en la actuación del operador, Buddaraju (2011) y Buddaraju et al. (2011) han llevado a cabo un experimento con dos interfaces de alarma: lista de alarmas por categorías (alarmas agrupadas en función de la prioridad y ordenadas por

tiempo de ocurrencia dentro de cada categoría) y lista cronológica de alarmas por orden de aparición, con la participación de veintitrés operadores de cinco industrias de oleoductos y refinerías. Los resultados mostraron que el tiempo de respuesta del operador fue significativamente diferente entre la tasa de presentación de 25 y 30 alarmas en 10 minutos. El tiempo de respuesta no fue estadísticamente significativo entre ambos tipos de pantallas, aunque las medias fueron mejores para la pantalla por categorías y los operadores expresaron sentirse más productivos con la pantalla de alarmas agrupadas por prioridad. Encontraron que el tiempo de respuesta del operador aumentó linealmente al cambiar la tasa de presentación de 15 a 25 alarmas en 10 minutos. Además, al ir incrementando la tasa de alarmas, el tiempo de respuesta de los operadores a las alarmas de baja prioridad aumentó ligeramente, ya que empleaban más tiempo en las alarmas de alta prioridad. Considerando la edad de los operadores, aquellos con más de 40 años obtuvieron mayores tiempos de respuesta en la tasa de presentación de 30 alarmas en 10 minutos, siendo estadísticamente significativo. Los resultados llevan a Buddaraju (2011) y Buddaraju et al. (2011) a concluir que la tasa de 30 alarmas en 10 minutos puede ser considerada como un punto decisivo, esto es, la tasa de alarmas en la que la respuesta de los operadores puede ser inexacta y donde los operadores podrían sentir presión para tomar decisiones. Strobhar y Harvey (2011) consideran que las directrices de ISA 18.2 (*Instrumentation, Systems, and Automation Society* (ISA), 2009) y de EEMUA (1999) resultan conservadoras, si una planta las alcanza, los operadores deberían ser capaces de manejar la carga de alarmas.

Campell Brown (2002, 2003) argumenta que las tablas 2-3 y 2-4 de EEMUA (1999) están basadas en principios de factores humanos y que realizan supuestos sobre el papel de un “operador típico” de instalación industrial. En ausencia de una mayor orientación dentro de EEMUA 191 (EEMUA, 1999), muchos usuarios han adoptado el punto de referencia de una alarma por cada diez minutos en promedio y diez alarmas en los diez minutos siguientes a una anomalía de planta como un umbral universal de aceptabilidad. Sin embargo, la experiencia práctica sugiere que para algunas plantas es una aspiración muy difícil, posiblemente incluso inalcanzable, con la tecnología actual. Por ello, Campell Brown (2002, 2003), a partir de los principios de EEMUA (1999), define cinco indicadores clave del rendimiento: sobrecargado, reactivo, estable, robusto y pronóstico. La clasificación ha sido adoptada posteriormente por numerosos autores, como, por ejemplo, Bloom, Bullemer y Reising (2013), EEMUA (2007), Gómez y Romero (2011), Grosdidier, Connor, Hollifield y Kulkarni (2003), Habibi (2003), Honeywell (2011c), Larsson, Öhman, Calzada y DeBor (2006), Rothenberg (2009a, 2009b), y Ruel y Marvan (2008). Los indicadores del rendimiento de Campell Brown (2002, 2003) son:

- Sobrecargado: el sistema de alarma es difícil de usar en operación normal y en la práctica es ignorado durante anomalías de la planta, puesto que resulta inservible. Continuamente se produce una tasa alta de alarmas, con un deterioro rápido del rendimiento durante las anomalías.
- Reactivo: el sistema de alarma es más estable y útil durante el funcionamiento a operación normal, pero a menudo resulta inutilizable durante anomalías de la planta.
- Estable: el sistema de alarma está bien definido para operación normal, pero es menos útil durante anomalías en la planta aunque, en comparación con el nivel reactivo, mejora los promedios y los máximos de las alarmas.
- Robusto: el sistema de alarma es fiable en todos los modos de planta, incluyendo la operación normal y los transitorios. Los operadores confían en el sistema. Disponen de tiempo para leer, entender y responder a todas las alarmas.

- Pronóstico: el sistema de alarma se mantiene siempre estable y proporciona al operador la información correcta en el momento adecuado. Las alarmas predicen y anticipan los problemas antes de que sucedan, para evitar anomalías en el proceso y minimizar el impacto de cualquier anomalía en la producción.

La tabla 2-7 presenta los niveles de rendimiento del sistema en función de las alarmas anunciadas, teniendo en consideración la tasa promedio por hora, la tasa máxima por hora y el tanto por ciento con más de 30 alarmas por hora (Campbell Brown, 2002, 2003).

Tabla 2-7. Niveles de Rendimiento del Sistema de Alarma (Campbell Brown, 2003)

Nivel	Tasa promedio por hora	Tasa máxima por hora	Inestable % horas ¹⁶
Nivel 5. Pronóstico	<6	<60	<1%
Nivel 4. Robusto	60>6	600>60	5>1%
Nivel 3. Estable	60>6	6000>600	25>5%
Nivel 2. Reactivo	600>60	>6000	50>25%
Nivel 1. Sobrecargado	>600	>6000	>50%

Para definir qué nivel es apropiado, hay que considerar un rango de factores: las tareas a realizar por el operador, la complejidad, la consecuencia del fallo en la acción, la velocidad requerida en la respuesta, la centralidad de la planta (implicaciones en unidades asociadas), el nivel de automatización y las estrategias de soporte y el coste de implantar mayores niveles de rendimiento (Campbell Brown, 2002, 2003).

En último lugar, se presentan las medidas de rendimiento de las alarmas de ISA-18.2 (ISA, 2009) (figura 14 del estándar) en la tabla 2-8. La tasa máxima de alarmas por hora está en 12 alarmas, mientras que la máxima por día es de 300 alarmas.

Tabla 2-8. Resumen de las Medidas de Actuación de Alarmas (ANSI/ISA-18.2-2009)

Medidas de actuación de alarmas estimadas sobre al menos datos de 30 días		
Medida	Valor objetivo	
<i>Alarmas anunciadas por tiempo:</i>	<i>Valor objetivo:</i>	<i>Valor objetivo:</i>
	<i>Muy probablemente aceptable</i>	<i>Máximo manejable</i>
Alarmas anunciadas por día por posición de operación	~150 alarmas por día	~300 alarmas por día
Alarmas anunciadas por hora por posición de operación	~6 (promedio)	~12 (promedio)
Alarmas anunciadas por 10 minutos por posición de operación	~1 (promedio)	~2 (promedio)
Medida	Valor objetivo	
Porcentaje de horas con más de 30 alarmas	~<1%	
Porcentaje de períodos de 10 minutos con más de 5 alarmas	~<1%	
Número máximo de alarmas en un período de 10 minutos	=10	
Porcentaje de tiempo del sistema de alarma en una condición de avalancha de alarmas	~<1%	
Porcentaje de la contribución de las 10 alarmas más frecuentes a la carga total de alarmas	~<1% a 5% máximo, con planes de acción para tratar las deficiencias.	
Cantidad de alarmas (molestas) de corta duración	Cero, planes de acción para evitar que suceda.	

¹⁶ % de las horas en que había más de 30 alarmas por hora.

Medidas de actuación de alarmas estimadas sobre al menos datos de 30 días	
Medida	Valor objetivo
Alarmas de estado	Menos de 5 en un día, con planes de acción para tratarlas.
Distribución de la prioridad de las alarmas	3 prioridades: ~80% Baja, ~15% Media, ~5% Alta o 4 prioridades: ~80% Baja, ~15% Media, ~5% Alta, ~<1% Muy Alta. Otras prioridades de usos especiales excluidas del cálculo.
Supresión de alarmas no autorizadas	Cero alarmas suprimidas fuera de las metodologías controladas o aprobadas.
Cambios de los atributos de alarmas no autorizados	Cero cambios en los atributos de las alarmas fuera de las metodologías aprobadas o gestión del cambio.

2.4 PROCEDIMIENTOS DE RESPUESTA A LA ALARMA Y DE OPERACIÓN DE EMERGENCIA

Los operadores tienen que responder enseguida a las condiciones de alarma, de conformidad con el procedimiento de respuesta a la alarma, establecido para todos los paneles, para evitar situaciones o emergencias indeseables y atenuar las consecuencias de un accidente (IAEA, 2012). Los procedimientos de respuesta a la alarma están disponibles para las condiciones de alarma que requieren una respuesta que afecta al sistema de control del proceso o al equipo de planta, teniendo el operador acceso inmediato a ellos desde la ubicación de lectura de los mensajes de alarma (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b).

Los procedimientos de respuesta a la alarma sirven de guía a los operadores para verificar condiciones anómalas en el estado de la central y especifican las correspondientes acciones o procedimientos ulteriores (IAEA, 2012). Los procedimientos de respuesta a la alarma ofrecen información más detallada sobre la naturaleza de la condición de alarma, que resulta especialmente importante para los operadores cuando se activa una alarma desconocida (poco familiar) o cuando una alarma parece inconsistente con la comprensión del operador sobre el estado de la planta (EPRI, 2003e; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). De hecho, los procedimientos no sólo proporcionan instrucciones escritas para confirmar y dar respuesta a la alarma, sino que también muestran los datos necesarios para apoyar estas tareas, por ejemplo, los valores de las variables que necesitan ser comprobados o el estado de los componentes (EPRI, 2005). Los procedimientos pueden estar impresos en papel y también en pantalla de ordenador, facilitando el acceso instantáneo a información detallada de la alarma.

En las primeras etapas de las anomalías, las acciones habitualmente se guían por procedimientos de operación anormal o Procedimientos de Operación de Emergencia (POE), que están diseñados para garantizar el mantenimiento de las funciones críticas de seguridad, independientemente del evento acontecido (EPRI, 2003a). Durante la aplicación de un POE, se debe otorgar más prioridad a la evaluación de las funciones de seguridad que a la evaluación del estado de la alarma (IAEA, 2012).

3 FILOSOFÍA BÁSICA DEL SISTEMA DE ALARMA EN LA SALA DE CONTROL

Con el objetivo de describir la filosofía básica del sistema de alarma en la sala de control, presentamos la motivación para investigar los sistemas de alarma, una revisión de las definiciones de los términos alarma y sistema de alarma, los usos que los operadores realizan de las alarmas, para terminar con los criterios funcionales por los que se rige el sistema de alarma de una central nuclear. Cada una de las secciones, a su vez, se expande en diversos subcapítulos.

La madurez de un campo de investigación se puede evaluar determinando si existe consenso en la definición de los términos básicos (Vicente, 1996), lo que, en este caso, se traduce en la existencia de un acuerdo en la literatura sobre el concepto de alarma y el propósito de un sistema de alarma.

La definición del concepto de alarma y de sistema de alarma, en la industria nuclear, ha ido evolucionando en función de los desarrollos tecnológicos, en donde se han implantado las alarmas, como se observa, por ejemplo, en las definiciones proporcionadas por el organismo regulador estadounidense NRC, en la sección glosario del documento “*Human-System Interface Design Review Guidelines*” (NUREG-0700), en sus tres revisiones de 1981, 1996 y 2002. Igualmente parece suceder con los usos dados al sistema de alarma, como se expone posteriormente.

3.1 ¿POR QUÉ ESTUDIAR LAS ALARMAS?

Con la pregunta de por qué estudiar las alarmas abordamos la justificación de la investigación llevada a cabo en el proyecto de la tesis doctoral. En el marco de investigación y desarrollo de la aproximación de los factores humanos ha tenido una amplia relevancia el análisis del comportamiento del operador, sus capacidades y sus limitaciones, y su interacción con los elementos de la sala de control en la gestión del proceso. En el ámbito nuclear, el primer programa de factores humanos, del organismo regulador U.S. NRC, se estableció posteriormente al accidente de la unidad 2 de *Three Mile Island* (TMI), basándose en estudios como el informe de la Comisión Kemeny (Kemeny, 1979) y el informe Rogovin (Rogovin y Frampton, 1980), que identificaron numerosas deficiencias de factores humanos (NRC, 1983). Posteriormente, un panel de expertos en necesidades de investigación de factores humanos en regulación nuclear, formado por el Consejo de Investigación Nacional, desarrolló para U.S. NRC un plan de acción de factores humanos (Moray y Huey, 1988), que estaba organizado en cinco áreas principales: diseño de la interfaz persona-máquina, subsistema de personal, actuación humana, gestión y organización y el entorno regulador. Entre otros, el panel identificó en el área de actuación humana, la necesidad de desarrollar la metodología y los datos para la caracterización, la medida y la predicción de la actuación humana.

Las alarmas y el sistema de alarma en su globalidad constituyen un elemento vital de la sala de control, apoyan al operador en la tarea de detección de anomalías, pero, además, sirven a una diversidad de funciones, tanto en operación normal como accidental.

Lupton (1996) en la sesión inaugural de una reunión de especialistas en sistema de alarma de centrales nucleares, organizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1996a) en Canadá, proporcionó una visión histórica del tema. La necesidad de mejorar la anunciación de los sistemas de alarma en las centrales nucleares se reconoció en los años setenta. El accidente de TMI-2, en 1979, dio lugar a iniciar un gran esfuerzo de investigación a nivel mundial, con una tendencia a centrarse en la tecnología convencional. Desde entonces, han cambiado los requisitos de las salas de control y de las interfaces persona-máquina, en aspectos como el desarrollo de nuevos estándares para el diseño de salas de control, los avances tecnológicos en el procesamiento y la presentación de información y una evolución de los requisitos de licenciamiento que consideran, en mayor medida, los aspectos de factores humanos en la planta.

La transcendencia de llevar a cabo investigación en el área de las alarmas se ilustra con citas de autores de reconocida relevancia en la materia, Lees (1974), Kemeny (1979), Murray y Cox (1990), Woods (1995), y Mumaw, Roth, Vicente y Burns (2000).

Lees (1974, p. 418)¹⁷ señaló que el diseño de los sistemas de alarma de la industria¹⁸ era un área digna de investigación cuando escribió:

Alarm systems are often the least satisfactory aspects of process control system design. There are a number of reasons for this, including lack of clear design philosophy, confusion between alarms and statuses, use of too many alarms, etc. Yet with the relative growth in the monitoring function of the operator, and indeed of the control system, the alarm system becomes increasingly important. This is therefore another field in which there is much scope for work.

En el informe Kemeny sobre la investigación oficial del accidente de la central nuclear de Tres Millas unidad 2, el operador Craig Faust expresó a la Comisión su respuesta a las incesantes alarmas (Kemeny Report, 1979, p. 91):

“I would have liked to have thrown away the alarm panel. It wasn’t giving us any useful information.”

La influencia de las alarmas en la cognición de un controlador espacial de la misión del Apolo 12, después de que fuera alcanzado por rayos, se describe en Murray y Cox (1990, citado en R. I. Cook, Woods, & McDonald, 1991):

“The whole place just lit up. I mean, all the lights came on. So instead of being aids to tell you what went wrong, the lights were absolutely no help at all.”

El siguiente pasaje de Woods (1995, p. 2390) apareció en el artículo de *Ergonomics* “*The alarm problem and directed fault attention in dynamic fault management*”:

[If alarms] become a “normal occurrence”, then the alarm will become part of the routine flow of action, and it will not function to break attention away from other mental and physical activity. In aggregate, trying to make all alarms unavoidable redirectors of attention overwhelms the cognitive processes involved in control of attention and exacerbates the alarm problem. One kind of operational response to this should not really be surprising –practitioners ignore or turn off the alarms.

Mumaw, Roth, Vicente y Burns (2000, p. 36) introducen el artículo de *Human Factors* “*There is more to monitoring a nuclear power plant than meets the eye*” con una cita de un operador anónimo de central nuclear:

“If I ever took an alarm summary and didn’t find anything there, I wouldn’t believe it. I would think that there was something wrong with the computer.”

Las alarmas continúan siendo un elemento problemático en las centrales nucleares. La investigación patrocinada por U.S. NRC para identificar aspectos de actuación humana relacionados

¹⁷ Lees (1974) es a su vez citado por diversos especialistas en el ámbito de los sistemas de alarma en el control de procesos, como Kortlandt y Kragt (1978, p. 136), Stanton (1994b, p. 1) y Stanton (1996, p. 76).

¹⁸ Lees (1983) se refiere tanto a los sistemas convencionales como a los sistemas computarizados.

con la integración de nuevas tecnologías en las centrales nucleares dio como resultado sesenta y cuatro temas de investigación, estando entre los veinte de máxima prioridad el diseño del sistema de alarma (O'Hara et al., 2009; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al., 2008). La identificación del problema está ilustrada en la siguiente cita de O'Hara et al. (2009, p. 232), O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008, p. 88) y O'Hara, Higgins, Brown, Fink, Persensky, et al. (2008, p. 40):

Since alarm systems monitor the plant and often are the initial means by which plant disturbances are brought to the operator's attention, its design directly affects monitoring, detection, and situation assessment. One specific concern identified is the potential exacerbation of the alarm "overload" problem resulting from the additional alarms associated with digital systems. The challenges and difficulties of effective alarm system design are highlighted by the fact that human performance issues related to alarm system design persist in the nuclear industry and in many other industries despite efforts to address them.

Todavía hay una necesidad de seguir mejorando e innovando para diseñar sistemas de alarma útiles para el operador (Berg, Kaarstad, Farbrot, Nihlwing, Karlsson y Torralba, 2011). Concluir el apartado con áreas posibles de investigación propuestas en O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008), destacan, entre otras, el realizar el análisis de datos de movimientos oculares para entender mejor el uso del sistema de alarma en diferentes escenarios, examinar las pantallas de alarma combinando alarmas en ventanillas (referido también como *cajetín anunciador*), alarmas integradas y mensajes de alarma (con diseños mejorados de lista de mensajes) y examinar la función de los sistemas de alarma en la sala de control convencional frente a avanzada. Asimismo, el grupo de expertos del CSNI NEA (*Committee on Safety of Nuclear Installations Nuclear Energy Agency*) sobre factores humanos y organizativos (*Special Expert Group on Human and Organisational Factors - SEGHO*) plantea ocho grandes áreas de investigación sobre actuación humana en salas de control con nuevas tecnologías (procesos de modernización y nuevas plantas), incluyendo la gestión de sucesos no planificados y no anticipados, los principios de diseño de la interfaz para apoyar las funciones cognitivas del operador (OECD, NEA, CSNI, 2009b).

3.2 ¿QUÉ ES UNA ALARMA?

Existe generalmente consenso en que las alarmas son señales que se anuncian al operador, mediante una señal audible, alguna forma de indicación visual, habitualmente destello, y por la presentación de un mensaje o algún otro identificador. A continuación se presenta una revisión del concepto de alarma, siguiendo un orden cronológico.

3.2.1 Aproximaciones a la definición de alarma

EPRI (Fink, 1984, 1990; MPR Associates, 1985) definen la alarma como:

- Una condición anormal del proceso que requiere la acción del operador.
- El estado de la secuencia cuando se produce una condición anómala del proceso.
- Un dispositivo que llama la atención sobre la existencia de una condición anormal en el proceso.

Goodstein (1985) distingue el papel de la alarma en panel y en PVD. El rol es alertar al operador en ambos casos y, además, señalar los sub-paneles adecuados (sala de control convencional) o ayudar a seleccionar el display apropiado (con PVD).

Las alarmas son señales distinguibles que se muestran para atraer la atención de los operadores de la sala de control hacia condiciones anómalas de la planta (Hollywell y Marshall, 1994). También indican que una alarma es la consecuencia de que un parámetro excede los límites, especificados por el diseñador o por los operadores, de la operación normal de la planta.

En el Proyecto Halden, Bye y Moum (1996) definen que una alarma indica un estado anómalo o una combinación de estados que requiere la atención del operador. Posteriormente, Sørenssen et al. (2002) emplean la definición de alarma individual de EEMUA (1999).

En U.S. NRC (NRC, 1996; O'Hara, Brown, Higgins y Stubler, 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b), el término alarma se emplea en un amplio sentido, como un parámetro, componente, sistema o función de planta cuyo estado requiere la atención del personal de la planta. La alarma puede originarse al superar un punto de tarado o un valor, o ser el resultado del sistema de procesamiento de alarmas, como en la generación de la alarma. No obstante, en un sentido más estricto, el término alarma se emplea para proporcionar un mensaje para evocar la atención del personal de la planta a una desviación no especificada, o potencialmente adversa, del valor o del comportamiento esperado de un parámetro, componente, sistema o función de la planta (NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994).

En la industria petrolífera (refinería de petróleo), Campbell Brown y O'Donnell (1997) y Campbell Brown (1998) definen una alarma como una advertencia al operador de que se requiere una acción inmediata para corregir una condición de la planta. Establecen, así mismo, que hay que diferenciar una alarma de una alerta o un estado.

Bransby y Jenkinson (1998a) consideran que la alarma es una señal diseñada para alertar, informar, guiar o confirmar. Precisamente, alertar, informar, guiar o confirmar son las funciones del sistema de alarma definidas inicialmente por Rankin, Duvernoy, Ames, Morgenstern y Eckenrode (1983). Posteriormente se verá que diversos autores proporcionan, asimismo, esta definición para el sistema de alarma. Un aspecto importante para Bransby (1998b) es que las alarmas tienen que hacer que el operador responda, por medio de una acción de control, con una respuesta mental o una respuesta condicional.

Una alarma indica un problema que requiere la atención del operador y, generalmente, se inicia por una medida del proceso, que pasa un umbral definido de alarma, cuando se aproxima a un valor no deseado o potencialmente inseguro (EEMUA, 1999). La alarma individual se define en relación con la función primaria del sistema de alarma, del siguiente modo (EEMUA, 1999):

- Cada alarma debería alertar, informar y guiar¹⁹.
- Cada alarma presentada debería ser útil y relevante para el operador.
- Cada alarma debería tener una respuesta definida, que puede ser física o mental.

El Consorcio ASM (Koene y Vedam, 2000) define la alarma como una señal al operador, que provoca una respuesta bien definida, por lo que comprende la definición de EEMUA (1999).

¹⁹ Son tres de las cuatro funciones del sistema de alarma de Rankin et al. (1983).

NAMUR NA102 (NAMUR, 2003) y Dzwig (2008) definen una alarma cómo una indicación que requiere una respuesta inmediata del operador. NAMUR (2003) considera que la respuesta puede ser, por ejemplo, la intervención manual, el aumento de la vigilancia o iniciar una investigación. Continúa con que las alarmas señalan desviaciones del proceso y/o de la planta con respecto al estado normal, requiriendo una respuesta inmediata por parte del operador para prevenir situaciones peligrosas (sistema de aviso temprano para evitar disparos de emergencia) y pérdidas económicas (la calidad y la cantidad del producto).

Las alarmas atraen la atención sobre posibles problemas y solicitan la intervención humana (Xiao, Seagull, Nieves-Khouw, Barczak y Perkins, 2004).

La alarma es una señal al operador de que debe intervenir en la operación del proceso para corregir una condición en la planta y retornar el proceso a un estado normal o para prevenir que el proceso entre en una condición anómala o insegura (O'Brie y Woll, 2004). Las alarmas alertan, informan y guían¹⁹ al operador de un cambio hacia el curso de la acción correctora (O'Brie y Woll, 2004).

El estándar IEC 62241 (*International Electrotechnical Commission* (IEC), 2004) describe la alarma como información de diagnóstico, pronóstico o guía, para llamar la atención del operador a una desviación del proceso o del sistema. La información proporcionada por la alarma incluye la existencia de una anomalía para la que puede ser necesario una medida correctiva, la causa y las posibles consecuencias de la anomalía, el estado general de la planta, la acción correctiva de la anomalía y la retroalimentación de las acciones correctoras. Reconoce dos tipos de cambios: no planificados (desviaciones del proceso y fallos indeseados del equipo) y planificados (cambios en las condiciones del proceso o en el estado del equipo que son una respuesta esperada a condiciones de la planta).

Shahriari et al. (2006), en el ámbito de la industria petrolífera, consideran que una alarma es un indicador iniciado por una variable del proceso que pasa un límite definido (condición indeseable o insegura), que se transmite al operador por medio del sistema de alarma. El sistema de alarma proporciona orientación a los operadores, indica que es necesaria una acción correctiva única e inmediata (Shahriari et al., 2006).

Chériaux fue el investigador principal en un estudio de revisión de los sistemas de alarma de cincuenta y ocho centrales nucleares francesas de EdF, patrocinado por EPRI (EPRI, 2006), con el objetivo de proporcionar recomendaciones sobre requisitos para el diseño del sistema de alarma. EPRI (2006) define una alarma como un fallo (cambio indeseable en la planta o una condición fuera de lo normal de la planta) que requiere la intervención del operador. Esta definición implica que las acciones requeridas al operador deben alcanzarse en un tiempo determinado, o de lo contrario deben ser acciones automáticas. La acción correctiva, que requiere la alarma, puede consistir en acciones manuales de los operadores y la supervisión de la retroalimentación sobre los resultados de estas acciones manuales, o bien la supervisión de la retroalimentación de los resultados de las acciones automáticas (EPRI, 2006). Posteriormente, Chériaux, Salaün y Naser (2010, 2011) exponen que, en la industria nuclear, una alarma es información generada con el fin de alertar a un operador, o a otro usuario, de un fallo, un incorrecto funcionamiento o una condición fuera de lo normal que requiere una acción. La respuesta requerida puede ser una acción del operador manual o la monitorización de la eficacia de una acción automática, como argumenta también EPRI (2006).

Thunberg y Osvalder (2007a, 2007b, 2009) definen una alarma como una señal que indica una condición anómala o desviación, o una combinación de condiciones que solicita la atención del operador (EEMUA, 1999), y la alarma debe requerir una respuesta física o cognitiva.

El estándar ISA-18.2 (ISA, 2009) y la práctica recomendada ISA RP77.60.02-2000 (ISA, 2010) establecen que la alarma es un medio audible o visible para indicar al operador un mal funcionamiento del equipo o del proceso o una condición anormal que requiere una acción del operador.

Rothenberg (2009a) define cuatro fundamentos o preceptos, que rigen el diseño del sistema de alarma, definen una alarma. Los principios fundamentales de diseño de la filosofía del sistema de alarma son:

- Responder a cada alarma, ya que ésta requiere acción. Cada alarma activada debería requerir y esperar una respuesta del operador (una acción puntual), y la acción debe ser necesaria. Es el atributo que define la alarma.
- Proporcionar tiempo suficiente para responder con éxito. Facilitar el tiempo adecuado para que el operador entienda e implemente la acción correctiva apropiada, para remediar la situación. Proporcionar el tiempo suficiente para que el proceso responda. El requisito del tiempo se emplea para determinar el umbral de activación de la alarma y para asegurar que las herramientas que necesitan los operadores están disponibles y son adecuadas.
- Proporcionar información adecuada. Cada alarma anunciada debería alertar, informar y guiar¹⁹. La activación de la alarma debe proporcionar información que asista al operador a entender lo que significa la alarma y, también, debe incluir una guía para ayudar al operador en la determinación de la causa raíz, así como para sugerir el camino hacia la resolución del problema.
- Alarmar las situaciones importantes. Sólo las situaciones importantes, anómalas y relevantes, deben alarmarse. Las situaciones que no son importantes pueden requerir una respuesta del operador, pero no amenazan la integridad del proceso, por lo que no deben “obstruir” el sistema de alarma.

Wallin (2009) proporciona, en el dominio de la industria de las telecomunicaciones, una definición de las alarmas como desviaciones de operación normal que requieren la intervención del operador. La acción puede ser para resolver el problema o para confirmar la alarma como irrelevante (Wallin, 2009). Posteriormente, Wallin, Leijon, Nordlander y Bystedt (2011) sostienen que una alarma indica un estado indeseable en un recurso para el que se requiere una acción del operador; el operador es alertado con el fin de prevenir o mitigar la degradación o la interrupción del servicio.

Las alarmas sirven para notificar a los operadores condiciones fuera del parámetro que podrían amenazar al equipo, al medio ambiente, a la calidad del producto y a la vida humana (Braun, Grimes y Shaver, 2011).

Stauffer y Clarke (2012) exponen que el propósito de una alarma es notificar al operador una anomalía del equipo, la desviación del proceso o una condición anómala que requiere una respuesta. Las alarmas ayudan al operador a mantener el proceso dentro de las condiciones normales de operación. También juegan un papel importante en el mantenimiento de la seguridad de la planta, proporcionando un medio de reducción del riesgo (capa de protección) para prevenir la ocurrencia de daño debido a un peligro en el proceso.

La alarma es una señal que indica una combinación de condiciones que requiere la atención del operador, conlleva una respuesta física o cognitiva, debe ayudar al operador a diagnosticar fallos (Luquetti dos Santos et al., 2013).

3.2.2 Concepto de anunciador, alerta, mensaje o estado en relación con alarma

En el ámbito nuclear, el concepto de alarma está estrechamente relacionado con el anunciador y la alerta. El concepto de alarma comúnmente se diferencia del concepto de anunciador, de alerta y de mensaje o estado del siguiente modo:

- Anunciador. Conforme al NUREG-0700, un anunciador es un indicador del estado de un parámetro, componente, sistema o función de la planta que no requiere necesariamente la atención del personal de planta (NRC, 1996). El término anunciador se emplea para referirse a la parte del display de un sistema de alarma espacialmente dedicado, en plantas convencionales (NRC, 1996, p. G-2; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b, p. G-2). Conceptualmente, la alarma se diferencia del anunciador en requerir la atención del operador (NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b).
- Alerta. Una alerta es una información que indica la desviación del rango normal antes de ser necesario tomar acciones, que requiere la atención del operador a fin de monitorizar y prevenir fallos y anomalías (Chériaux et al., 2010, 2011). El Consorcio ASM considera que las alertas son señales proporcionadas a los operadores, quienes deben ser conscientes de algo que sucede en la planta, constituyen un mecanismo de aviso sin requerir una intervención inmediata (Campbell Brown y O'Donnell, 1997; Koene y Vedam, 2000; O'Brien y Woll, 2004); en cambio, una alarma es una señal que provoca una respuesta bien definida (Koene y Vedam, 2000). Una alerta generalmente indica que se espera, en corto plazo, un suceso peligroso si no cambia nada (Bliss, 1999). Mientras que las alertas tienden a incluir un elemento de aviso previo, por lo que el operador dispone de cierto tiempo antes de tomar la acción, por el contrario, las alarmas son más urgentes y exigen una solución de la situación inmediata (Bliss, 1999). En resumen, la principal característica que distingue una alarma de un aviso²⁰ o de una alerta de alteración normal de un parámetro del proceso es el hecho de que la alarma siempre requiere una respuesta del operador.
- Mensaje o estado. La alarma se distingue también de un mensaje o de un estado. NAMUR (2003) mantiene que un mensaje se diferencia de una alarma en que el mensaje señala la ocurrencia de un suceso que no requiere acción inmediata del operador. Un estado es una indicación de un cambio a largo plazo en la situación de la planta (Campbell Brown y O'Donnell, 1997).

3.2.3 Resumen del concepto de alarma

La mayoría de las definiciones que hemos revisado del ámbito de la industria nuclear consideran que para fijar con claridad la significación del término alarma tiene que requerir una respuesta del operador. O lo que es lo mismo, si no puede definirse una respuesta para una condición, entonces no debe mostrarse una alarma (por ejemplo, Alford, Kindervater y Stankovich, 2005; Bransby, 1998b; Campbell Brown, 1998; Campbell Brown y O'Donnell, 1997; Chériaux et al., 2010, 2011; DeVries, 2010; Dzwig, 2008; EEMUA, 1999; EPRI, 2006; Fitzpatrick, 2006; ISA, 2009, 2010;

²⁰ Un aviso generalmente significa que puede suceder un incidente peligroso si prevalecen determinadas circunstancias (Bliss, 1999).

Luquetti dos Santos et al., 2013; NAMUR, 2003; O'Brien y Woll, 2004; Rothenberg, 2009a; Shahriari et al., 2006; Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b, 2009; Xiao et al., 2004).

La respuesta puede ser física o cognitiva (Bransby, 1998b; Chériaux et al., 2010, 2011; EEMUA, 1999; EPRI, 2006; Luquetti dos Santos et al., 2013; NAMUR, 2003; NPD, 2001; O'Hara, Brown, et al., 1994; Sørenssen et al., 2002; Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b, 2009). Una respuesta física es, por ejemplo, apretar un botón mientras que una respuesta mental puede consistir en monitorizar un determinado sistema (EEMUA, 1999).

3.3 ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE ALARMA?

Un sistema de alarma es un elemento fundamental en casi todas las interfaces modernas de las plantas industriales (refinerías, plantas energéticas, plantas químicas o centrales nucleares), asimismo, en el control del tráfico (aéreo, ferroviario, del suburbano), en la aviación civil o militar y en el ámbito de la medicina, entre otros.

Vicente (1996) argumenta que resulta útil distinguir entre los propósitos de los diseñadores del sistema y aquellos que en la práctica cumple para los operadores (fines operacionales). Hemos adoptado esta clasificación al identificar las definiciones y las aproximaciones al concepto de sistema de alarma. En esta sección se expone la definición de los diseñadores mientras que en el apartado posterior, denominado usos diversos de la información de alarmas, se presenta la perspectiva del personal de operación.

A continuación analizamos, en primer lugar, la definición de un sistema de alarma, en segundo lugar, exponemos las principales características de un buen sistema de alarma y, por último, los requisitos a satisfacer por el sistema de alarma.

3.3.1 Definición de sistema de alarma

Iniciamos la revisión presentando los conceptos del documento de referencia más relevante sobre la interfaz de sala de control del ámbito nuclear, el NUREG-0700. En su primera edición, exponía que “los sistemas de avisos anunciadores son la interfaz primaria de la sala de control para alertar inmediatamente al operador de cambios fuera de tolerancia de la condición de la planta” (NRC, 1981, p. 6.3-1). Consta de tres subsistemas de alerta audible, de alarma visual y para la respuesta del operador. En las revisiones posteriores del NUREG-0700, un sistema de alarma es considerado “un sistema automatizado que consta de *hardware* y *software* de procesamiento y display, que procesa o analiza señales de los sensores de la planta, y alerta al operador vía displays visuales y/o audibles cuando los parámetros monitorizados se desvían de los límites especificados (puntos de tarado)” (NRC, 1996, p. G-2; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b, p. G-2) “o de condiciones predefinidas” (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002, p. G-2).

NUREG-0700 establece la siguiente distinción conceptual entre un sistema de alarma convencional y un sistema avanzado:

- Un sistema convencional es, sobre todo, “un sistema analógico de alarmas que apenas emplea, o no emplea, la lógica de procesamiento de presentación de alarmas, y dispone de tecnología convencional en los controles (pulsadores o botones) y en los displays (ventanillas anunciadoras)” (NRC, 1996, p. G-5; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b, p. G-5).

- Un sistema avanzado es fundamentalmente “un sistema de alarma digital que emplea la lógica de procesamiento de alarmas y tecnología avanzada de controles (controles en pantalla) y de displays (PVD)” (NRC, 1996, p. G-1; O’Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b, p. G-1).

Rankin, Duvernoy, Ames, Morgenstern y Eckenrode (1983) fueron probablemente los primeros autores en definir –recogido en el documento NUREG/CR-3217 de la NRC– que la filosofía básica del sistema de alarma está formada por cuatro criterios funcionales: alertar, informar, guiar y confirmar, así como seis principios básicos de diseño, para solucionar los problemas encontrados en los sistemas anunciadores y mejorar el diseño del sistema. Esta aproximación corresponde a estados del procesamiento de la información. Conforme a Rankin et al. (1983) el sistema de alarma deberá:

- Alertar al operador sobre la existencia de una desviación en el proceso.
- Informar al operador sobre la prioridad y la naturaleza de la desviación.
- Guiar la respuesta inicial de los operadores a la desviación. Cuando los operadores realizan acciones correctivas, como puede ser el seguimiento de procedimientos o la monitorización de acciones automáticas, el sistema de alarma contribuirá al conocimiento del operador.
- Confirmar, puntualmente, si la respuesta del operador corrigió la desviación. Después de que las acciones se inicien, el sistema de alarma deberá confirmar si la respuesta influyó en la situación del proceso.

Rankin et al. (1983) relacionan las características de diseño del sistema de alarma (por ejemplo, audibles, controles del operador, propiedades de las ventanillas, etc.) con cada uno de los cuatro criterios funcionales. Los criterios funcionales se establecieron para alcanzar el requisito del sistema anunciador de minimizar que las posibles desviaciones en los sistemas y los procesos de la planta se conviertan en peligros significativos (Rankin, Rideout, Triggs y Ames, 1985). Los cuatro criterios funcionales de Rankin et al. (1983) han sido adoptados por diversos autores, entre otros, Berg et al. (2011), Brown et al. (2000), Bye, Kårstad, et al. (1992), Bye y Moum (1996), DeVries (2010), EPRI (2004a), Førdestrømmen, Moum y Torralba (1994), IAEA (2001), Jönsson, Osvalder, Holmström y Dahlman (2004), NRC (1996), O’Hara, Brown, et al. (1994), Rankin et al. (1985), Shimada, Yamamoto, Tani y Kobashi (1996), Sørenssen et al. (2002), Thunberg y Osvalder (2007a, 2007b). Tres criterios (alertar, informar y guiar) son referidos también por EEMUA (1999), IEC (2004), Jang, Keum, et al. (2008), NPD (2001), O’Brie y Woll (2004) y Rothenberg (2009a).

Algunas modificaciones con respecto a las funciones básicas de la alarma fueron introducidas en la última revisión del NUREG-0700 (O’Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b), en donde las funciones son para alertar al operador, guiar las acciones del operador, ayudar al operador a monitorizar los sucesos de la planta y facilitar la interacción del operador con la planta. Por lo tanto, de las funciones iniciales mantienen las funciones de alertar y de guiar al operador, mientras que la de informar se concreta en ayudar y la de confirmar en la interacción. Esta filosofía de alarma, criterios funcionales, conlleva implicaciones, requisitos o demandas importantes en el diseño del sistema, ya que no resulta suficiente con que el sistema alerte al operador de la existencia de una desviación.

Para continuar se presentan otras definiciones de lo que constituye un sistema de alarma, principalmente del ámbito nuclear, ordenadas cronológicamente.

Hollo (1977) resume el papel de las alarmas, en un sistema avanzado, de la siguiente manera:

- Informar al operador de que sucedió algo (una simple notificación de anormalidad).
- Informar al operador de las consecuencias temporales de un suceso.

- Iniciar un procedimiento de análisis detallado.
- Simplificar el procedimiento de análisis mediante la eliminación de secuencias de sucesos imposibles o redundantes.
- Presentar patrones de alarma de nivel superior (reducción de alarmas).
- Indicar posibles sucesos futuros.

Algunos investigadores han sugerido que el sistema de alarma debe ser, también, responsable de diagnosticar el estado de la planta y, en algunos casos, de la planificación de la respuesta, integrando de este modo la detección de fallos con el diagnóstico de fallos, y la compensación, en un único sistema automatizado; este punto de vista estaba cubierto en el Sistema de Análisis de Anomalías (DAS) realizado en la década de los ochenta (Beattie et al., 1996; Gallagher, Leider y Crunk, 1982; Lees, 1983; Vicente, 1996).

Kragt (1983) y Kragt y Bonten (1983) argumentan que, puesto que el operador de sala de control no puede estar continuamente alerta, su atención debe ser dirigida inmediatamente hacia cambios importantes en el estado del proceso, siendo una de las funciones del sistema de alarma alertar al operador de los cambios en el proceso. Para ello, se emplean señales de advertencia (“a menudo injustamente llamadas alarmas”) (Kragt, 1983, p. 29; Kragt y Bonten, 1983, p. 587), que constan de una señal audible y una señal visual, y son generadas por el sistema anunciador. Los autores dividen los cambios en sucesos esperados e inesperados. Los sucesos inesperados generalmente son anomalías, llevando el proceso a un estado fuera de lo normal, en donde las variables del proceso exceden sus límites de alarma. Los sucesos esperados son, por lo general, el resultado de las acciones del operador.

En el marco del Proyecto Halden, S. Baker, Hollnagel, et al. (1985) identificaron cuatro objetivos de un sistema de alarma: alertar, informar, guiar y confirmar, haciendo referencia a los criterios funcionales definidos por Rankin et al. (1983). Las funciones de alertar e informar son las funciones básicas de las alarmas, mientras que guiar y confirmar están relacionadas con una función de información general (S. Baker, Hollnagel, et al., 1985). Posteriormente, Reiersen, Marshall y Baker (1987) definieron los objetivos de un sistema de alarma, centrándose en situaciones fuera de lo normal o anomalías, del siguiente modo:

- Alertar a los operadores de una anomalía en la planta.
- Guiar a los operadores al área con la anomalía.
- Ayudar a los operadores a localizar las variables con anomalías en el área adecuada de la planta.

Un buen sistema de alarma debería (Woods et al., 1987):

- Alertar al usuario de que puede existir una perturbación o anomalía.
- Proporcionar los medios para evaluar la anomalía.
- Proporcionar los medios para determinar la acción correctiva.

O’Hara y Brown (1991) añaden la relación entre el sistema de alarmas y el sistema de procedimientos POE, estableciendo que un sistema de alarma debe:

- Detectar una condición específica fuera de lo normal.
- Proporcionar anunciación del estado de la planta.
- Indicar las condiciones de entrada a los POE basados en síntomas.

- Indicar los puntos de ramificación a seguir en un POE.

El sistema de alarma en las centrales nucleares indica situaciones anómalas y ayuda a la toma de decisiones del operador (Yang y Chang, 1991).

Lupton, Lapointe y Guo (1992, citado en Vicente, 1996) consideran que la función de un sistema de anunciación está en alertar a los operadores de los cambios del estado de la planta. Incluyen también roles más específicos al proporcionar información para monitorizar la planta, interpretar los acontecimientos de la planta y tomar las medidas compensatorias. Constituye una definición muy amplia de un sistema de alarma, ya que incluye proporcionar apoyo a todos los aspectos del trabajo del operador, excluidas las tareas administrativas (Vicente, 1996).

Easter y Lot (1992) ponen un mayor énfasis en el potencial predictivo, informativo de un sistema de anunciación, y proporcionan dos objetivos de un sistema de alarma:

- Alertar a los operadores de la existencia de anomalías en el proceso.
- Transmitir información sobre las consecuencias futuras de una anomalía y sobre el estado objetivo al que restaurar el proceso.

Diversos autores de la Organización de Ciencia y Tecnología Nuclear de Canadá, *Atomic Energy of Canada Limited* (AECL), argumenta que la anunciación, junto con la monitorización rutinaria de las pantallas de la sala de control, permite que el personal de operación se mantenga al día de las condiciones reales de la planta y prediga estados futuros de la planta para todas las fases de operación de la central (Davey y Feher, 1997; Davey et al., 1995; Davey, Sheehy y Fiegel, 1993; Leger, Malcolm y Davey, 2006). La anunciación se utiliza para alertar rápidamente, al personal de sala de control, de los cambios importantes en las condiciones de la planta que pueden impactar en los objetivos operacionales (Davey y Feher, 1997; Davey et al., 1993, 1995; Hartley et al., 1998; Long y Davey, 1996), y apoya su respuesta a cambios importantes en dispositivos, equipos, sistemas o condiciones de la planta que pueden asimismo impactar en los objetivos operacionales (Davey y Feher, 1997; Hartley et al., 1998; Long y Davey, 1996). La anunciación es una función de la planta, que a su vez desempeña tres funciones: detectar y predecir, alertar y dirigir (Davey y Feher, 1997; Davey et al., 1992, 1993, 1995; Hartley et al., 1998; Long y Davey, 1996). Posteriormente, Davey y Lane (2001) y Leger et al. (2006) añadieron una cuarta función relativa a la presentación de información. Las cuatro funciones se describen a continuación:

- Detectar, y puede predecir, la ocurrencia de transiciones predefinidas en la planta, es decir, cambios en la planta. Predecir posibles cambios en los parámetros de la planta para proporcionar al personal de operación un plazo adicional para responder a la situación y evitar así la pérdida de producción o retos a la seguridad de la planta (Davey et al., 1992).
- Alertar a los usuarios de un parámetro del proceso o de una condición del sistema que es anómalo (cambios relevantes e importantes) para el estado operacional actual de la planta. Alertar para dirigir la atención de un operador, desde cualquier tarea que está realizando, hacia un cambio operacionalmente relevante en el estado de la planta (Davey et al., 1995), ajustando las demandas impuestas a la atención del usuario para reconocer los cambios a las exigencias de otras tareas concurrentes en la sala de control (Hartley et al., 1998; Long y Davey, 1996). Sirve para dirigir la atención por la forma en que se transmite la información específica de la planta y por la importancia percibida del contenido del mensaje (Davey et al., 1992, 1993).

- Dirigir a los usuarios a información adicional de la planta para entender y responder a la transición (a los cambios). Ayuda a los usuarios conduciéndoles a información adecuada de la planta para poder responder a la situación, por ejemplo, información para identificar, asistir, guiar o confirmar, tal como el procedimiento aplicable o la documentación de los equipos (Davey et al., 1992, 1993).
- Presentación de información sobre los cambios detectados en la planta, de manera que se comunica la naturaleza y la importancia relativa de los cambios, y se informa sin abrumar ni distraer (Davey y Lane, 2001; Leger et al., 2006).

Stanton (1994b) destaca que el rol de la alarma está en advertir de un peligro inminente, aunque en diferentes grados de severidad. El propósito de una alarma no debe estar en “empujar” a los operadores a tomar acciones, en cambio en conseguir que actúen de manera correcta (Stanton, 1991). La interpretación de una alarma depende en gran medida del contexto (Stanton, 1992, 1994a, 1995, 1996a; Stanton y Barber, 1995). Stanton y Booth (1990) y Stanton (1994b) enumeran una variedad de roles, con funciones distintas de llamar la atención, para los puede servir un sistema de alarma:

- Mostrar un cambio inesperado en el estado del sistema.
- Mostrar cambios en el estado del sistema.
- Atraer la atención de los operadores.
- “Despertar” a los operadores.
- Cambiar el estado mental de los operadores.

Woods (1995) considera que el propósito de un sistema de alarma está en dirigir la atención de los operadores (del observador humano), por lo que puede servir para interrumpir, advertir o recordar algo a los operadores.

Un sistema de alarma es un sistema para generar y procesar alarmas y presentarlas a los usuarios (Bransby y Jenkinson, 1998a). Bransby (2001) destaca la importancia del sistema de alarma porque proporciona estímulos para que el operador tome conciencia de un problema operacional. Debe dirigir la atención del operador a una situación anómala para que pueda tomar acciones preventivas.

Campbell Brown y O'Donnell (1997) y Campbell Brown (1998) consideran que el propósito de un sistema de alarma de control distribuido está en ayudar al operador en la detección de problemas del proceso que requieren su intervención y en priorizar su respuesta.

Para Dicken (1999b) la función básica del sistema de alarma es hacer que el operador sea consciente de condiciones de la planta que requieren evaluación o acción puntual. Al responder a una alarma, el operador tiene que:

- Entender lo que la alarma indica, es decir, cuál es el problema.
- Comprender la condición actual del proceso.
- Decidir sobre el curso inmediato de la acción a tomar y llevarla a cabo.
- Investigar la causa raíz y realizar acciones correctivas, si es necesario.

Los sistemas de alarma son muy importantes para monitorizar la condición de la planta y para atraer la atención del operador hacia cambios significativos, que requieran evaluación o acción. Los sistemas de alarma ayudan al operador a (EEMUA, 1999):

- Mantener la planta en el margen de seguridad operacional.
- Reconocer y actuar para evitar situaciones peligrosas.

- Identificar desviaciones de las condiciones deseadas de operación, que pueden llevar a pérdidas económicas.
- Un mejor entendimiento de las complejas condiciones del proceso. Las alarmas deberían ser una importante herramienta de diagnóstico.

En la aproximación de EPRI, dado que las tareas de los operadores de monitorizar el estado de operación de las centrales nucleares y de detectar problemas pueden resultar abrumadoras, debido a la gran cantidad de parámetros y condiciones individuales existentes, los operadores se apoyan para estas actividades en el sistema de alarma (EPRI, 2003e). El sistema de alarma alerta al operador de la sala de control sobre la existencia de una condición fuera de lo normal, que requiere la acción del operador (EPRI, 2003a, 2004a; Fink, 1990). Es un sistema automático para monitorizar, que alerta a los usuarios por medios visuales y audibles cuando los parámetros se desvían de los límites especificados (EPRI, 2003e, 2004a); en la mayoría de las plantas nucleares, esta función ha sido realizada por los sistemas anunciadores convencionales por cableado (EPRI, 2003a). Las funciones generales son alertar, informar, guiar y confirmar (EPRI, 2004a). El sistema de alarma incluye toda la funcionalidad de alarma existente en la sala de control, no estando necesariamente contenida en un sistema físico, puede ser proporcionada por los sistemas de control y de vigilancia de la planta, los sistemas de protección y otros sistemas de visualización de información (EPRI, 2005).

El estándar IEC 62241 (IEC, 2004) considera que un sistema de alarma es un sistema diseñado para alertar a los operadores de la existencia de una anomalía –desviación de un sistema o del proceso– que podría necesitar una acción correctiva. Normalmente, un sistema de alarma es una forma de realización físicamente distintiva, pero una sección de él puede constituir una parte integral de sistemas de I&C computarizados.

Para el estándar ISA-18.2 (ISA, 2009), el sistema de alarma comprende el *hardware* y el *software* que detecta el estado de una alarma, transmite la indicación de ese estado al operador y registra la transmisión.

Conforme a DeVries (2010) los sistemas de alarma deben alertar al operador de un posible problema, proporcionar un aviso con suficiente antelación para permitir la recuperación, guiar al operador al problema, a su causa y a la acción correctiva, y confirmar o negar la eficacia del esfuerzo de los operadores. Es la aproximación de los cuatro criterios funcionales expresados en Rankin et al. (1983, 1985).

Hugo (2012) expone que el sistema de alarma es una de las herramientas más importantes para ayudar al operador a responder a condiciones anómalas. El sistema de alarma proporciona un apoyo vital a los operadores al advertirles de situaciones que necesitan su atención y tiene un papel importante en la prevención, el control y la mitigación de los efectos de las situaciones anómalas. Notifica a los operadores los parámetros que están fuera de rango en una condición específica y que podrían poner en peligro la seguridad de los trabajadores de la planta, del público, del medio ambiente y la calidad de la producción (Hugo, 2012).

Los sistemas de alarma están diseñados para alertar a los operadores a condiciones de operación anómalas antes de que aparezcan situaciones de emergencia (Fickelscherer y Chester, 2013). Una alarma representa una condición anormal que requiere una respuesta (Fickelscherer y Chester, 2013).

En este apartado, relativo al análisis de la definición de qué es un sistema de alarma, hemos seguido la aproximación que adoptó Vicente (1996) al revisar sistemas de alarmas de centrales nucleares, patrocinado por el organismo regulador de Canadá, *Atomic Energy Control Board* (AECB), empleando indistintamente el término alarma y anunciación, lo que refleja el uso habitual en la literatura.

3.3.1.1 Resumen del término sistema de alarma

Este conjunto de definiciones muestra una falta de consenso en la literatura en cuanto al concepto, y a las funciones, de un sistema de alarma (Stanton, 1994a; Usher 1994; Vicente, 1996). Entre las áreas de desacuerdo en las definiciones de sistema de alarma, Vicente (1996) destacó si el sistema de alarma incluye el estado normal así como sucesos fuera de lo normal, si incluye las indicaciones esperadas e inesperadas, o si apoya explícitamente las actividades de toma de decisiones y de planificación de la respuesta.

Stanton (1994b) señala que la confusión sobre el papel del sistema de alarma se debe a la vaga definición de una alarma; parece que la definición depende en gran medida del propósito para el que servirá (Stanton, 1994c).

Resumiendo, las definiciones cubren una serie de funciones, que van más allá de llamar la atención del operador hacia cambios significativos, es decir, de alertar para detectar anomalías. Numerosos autores adoptan los cuatro criterios funcionales de Rankin et al. (1983, 1985): alertar, informar, guiar y confirmar (Brown et al., 2000; Bye, Kårstad, et al., 1992; Bye y Moum, 1996; DeVries, 2010; EPRI, 2004a; Førdestrømmen et al., 1994; IAEA, 2001; Jönsson et al., 2004; NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994; Rankin et al., 1985; Shimada et al., 1996; Sørenssen et al., 2002; Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b). Hay establecidas diferencias en función del medio de presentación de información (NRC, 1996; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b), una relación con el sistema de procedimientos POE (O'Hara y Brown, 1991), el apoyo en la toma de decisiones (Yang y Chang, 1991) o una función de predecir (Davey y Feher, 1997; Davey et al., 1992, 1993, 1995; Easter y Lot, 1992; Hartley et al., 1998; Long y Davey, 1996).

3.3.2 Características del sistema de alarma

En la tabla 3-1 están resumidas algunas de las características que debería tener un sistema de alarma, conforme a EEMUA (1999). NAMUR (2003) refiere que hay que prestar atención a estas características al definir las alarmas durante la fase de ingeniería. Un sistema de alarma efectivo constaría de las primeras cinco características para Koene y Vedam (2000). Rothenberg (2009a) expone que un buen sistema de alarma necesita tener seis atributos, compartiendo los cinco primeros de la tabla 3-1 y, un atributo adicional, denominado guiar, referido a facilitar la solución.

Tabla 3-1. *Características de un Buen Sistema de Alarma (EEMUA, 1999)*

Característica	Definición de la características del sistema de alarma
Relevante	No ser espurio o de bajo valor operacional.
Único	No duplicar otra alarma.
Puntual (a tiempo)	No mucho antes de que una respuesta sea necesaria o no demasiado tarde para actuar.
Priorizado	Indicación de la importancia del problema.
Entendible	Disponer de un mensaje claro y fácil de entender.
Diagnóstico	Identificar el problema que ha ocurrido.
Consultivo	Indicar la acción a tomar.
Focalizado	Llamar la atención a los aspectos más importantes.

3.3.3 Requisitos de alto nivel del sistema de alarma

EPRI (2005) define los requisitos del sistema de alarma, con el objeto de incorporar avances importantes para abordar los problemas de los sistemas convencionales de alarma de las plantas nucleares:

- Apoyar la jerarquía y la presentación de las alarmas. Incluye la generación de alarmas a nivel de planta, de sistema y de función, indicando la disponibilidad y el estado de operación de los principales sistemas de la planta y las funciones críticas, y alarmas más detalladas a nivel de componente o del parámetro individual.
- Generar alarmas que sean sensibles al contexto²¹. Las alarmas se generan considerando el contexto, empleando la lógica y el procesamiento que refleja la planta, el sistema y los modos de operación del equipo, de manera que sólo se originan alarmas cuando las condiciones están fuera de lo normal o son inesperadas para el estado operacional en curso.
- Separar la información de estado y las alarmas. Únicamente se procesan y presentan como alarmas las condiciones fuera de lo normal que requieren la intervención del operador.
- Separar las notificaciones de mantenimiento y las alarmas que requieren acciones del personal de operación. Las alarmas que requieren una acción por parte del personal de mantenimiento se anunciarán en una estación de trabajo de mantenimiento para dicho personal. Se presentan al operador las alarmas con impacto operacional que requieren, para responder al fallo, su acción.
- Apoyar la respuesta a transitorios y sucesos de la planta. La presentación de las alarmas ayuda al operador a determinar rápidamente las acciones a llevar a cabo a corto plazo para responder a las anomalías, a diagnosticar la causa del suceso y a determinar las acciones correctivas apropiadas, necesarias a largo plazo. Se incluyen capacidades como los procedimientos de respuesta a la alarma, la cronología de las alarmas y de los sucesos, o el registro de históricos para la revisión y el análisis posterior del evento.
- Elevar la fiabilidad y disponibilidad en condición normal y de accidente. El sistema incorpora redundancia y tolerancia a fallos y análisis de fallos, con el objeto de proteger de fallos individuales y de causa común y de evitar la pérdida de funcionalidad del sistema de alarma durante el ciclo de vida de la planta.
- Permitir crear y administrar alarmas definidas por el usuario. El sistema permite al operador definir y gestionar alarmas temporales para situaciones especiales que requieren una mayor

²¹ El concepto de diseñar alarmas que sean sensibles al contexto es ampliamente enunciado en la literatura de alarmas, como se expone a continuación en la sección de usos diversos de la información de alarma.

vigilancia de equipos o una configuración especial, estando las alarmas temporales bajo los controles administrativos correspondientes.

EPRI definió los requisitos de alto nivel para el sistema de alarma inicialmente en EPRI (1990), incluyendo: advertir la acción del operador, ayudar a determinar el estado de la planta y del sistema y, otros objetivos, entre ellos, la coordinación con los procedimientos de operación de emergencia y el plan de emergencia de la instalación, confirmar que las acciones tienen éxito, proporcionar un registro de históricos y reducir al mínimo la carga de trabajo del operador y la distracción debida al uso del sistema de alarma. Siendo, posteriormente, ampliados y más detallados (EPRI, 2005), mostrados a continuación en la tabla 3-2. Los requisitos están escritos desde el punto de vista del propietario de la planta y del usuario del sistema de alarma (EPRI, 2005).

Tabla 3-2. *Requisitos de Alto Nivel del Sistema de Alarma (EPRI, 2005)*

Requisito	Descripción del Requisito
Ayudar a iniciar la acción del operador	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe alertar a los operadores sobre condiciones de la planta fuera de lo normal, que requieren actuar. El propósito principal del sistema de alarma es notificar a los operadores una desviación del proceso, u otra condición anómala, que requiere la acción del operador. Definir como alarmas sólo aquellas condiciones que requieren una acción específica. – El sistema debe informar a los operadores sobre la naturaleza de la condición fuera de lo normal y los sistemas o componentes que están potencialmente afectados. – El sistema debería informar de la prioridad de la condición fuera de lo normal. La severidad de la condición (consecuencias de no responder) y la urgencia (tiempo disponible para responder) deben dictar la prioridad de la respuesta de los operadores. – El sistema debe guiar la respuesta inicial de los operadores a la condición anómala. El sistema de alarma debe proporcionar al operador acceso a los procedimientos de respuesta a la alarma (ARP) para la condición de alarma en particular y debe proporcionar o guiar al operador a la información necesaria del proceso o del sistema para confirmar y responder a la alarma.
Ayudar a determinar el estado de la planta y del sistema	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema debería facilitar la evaluación del estado de funcionamiento de la planta y de sus principales sistemas y componentes. Las alarmas deben alertar al operador de situaciones en las que un sistema o función de planta no está funcionando correctamente o no cumple los objetivos operacionales. – El sistema de alarma deberá proporcionar información para que los operadores puedan determinar la disponibilidad de los sistemas y los componentes de la planta. – El sistema debe ayudar a los operadores a identificar condiciones degradantes antes de que afecten a la operación de la planta (alarmas de <i>alerta temprana</i>). – El sistema de alarma debe indicar cambios en la situación de la central y del sistema. Las indicaciones de alerta temprana no sobrecargarán a los operadores ni les distraerán cuando realizan las acciones requeridas por las alarmas.
Ayudar en el diagnóstico y respuesta a los transitorios y sucesos de la planta	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe apoyar el diagnóstico de los transitorios y sucesos de la planta. El sistema de alarma debe proporcionar a los operadores información que identifique la causa del evento o, como mínimo, ayude a los operadores a determinar la causa raíz e identificar las acciones correctoras apropiadas. – El sistema debe apoyar el uso de procedimientos de operación de anomalías y de emergencia. – El sistema de alarma debe ayudar al operador a confirmar el éxito de las medidas adoptadas en respuesta a una alarma. – El sistema de alarma debe proporcionar un registro histórico de alarmas y de sucesos, el tiempo de ocurrencia en que se produjeron y cuando se desactivaron. El tiempo del reconocimiento de las alarmas debe ser registrado. – La información de alarma y del suceso debe integrarse con los datos

Requisito	Descripción del Requisito
	registrados de las variables de planta con el fin de su uso para la revisión y el diagnóstico con posterioridad al suceso, para la supervisión del rendimiento del sistema de alarma y de la planta y para el análisis de datos históricos.
Facilitar el mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe alertar al personal de mantenimiento de condiciones de la planta fuera de lo normal que requieren su atención. Las condiciones de alarma que requieren acciones de mantenimiento deben presentarse, por separado, al personal de mantenimiento de planta. – El sistema debe apoyar el trabajo en cooperación del personal de operación y de mantenimiento para responder a condiciones fuera de lo normal. – Las características del sistema de alarma, proporcionadas al personal de mantenimiento, deben permitir la integración con otros sistemas y capacidades de gestión del mantenimiento. – Deben proporcionarse características que faciliten la configuración, el mantenimiento y las pruebas del sistema de alarma. El sistema de alarma debe incluir características que indican continuamente que está funcionando de forma correcta. Además, debe proporcionar la capacidad de prueba manual, para que los usuarios puedan confirmar el correcto funcionamiento. – El sistema de alarma debe apoyar las pruebas de mantenimiento y de vigilancia de los sistemas y los equipos de la planta interconectados con el sistema de alarma.
Evita distraer o sobrecargar a los usuarios	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe reducir al mínimo las distracciones. – Al interactuar con el sistema, la carga de trabajo debe estar reducida al mínimo. – El sistema de alarma debe integrar la información de alarma de múltiples fuentes, proporcionar una interfaz consistente y fácil de usar para responder a las alarmas. – El sistema de alarma debe ser predecible y comprensible. – El sistema de alarma no debe sobrecargar de información a los usuarios.
Mostrar alta fiabilidad y disponibilidad	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe emplear la redundancia y otras características de tolerancia a fallos que, junto con el uso de <i>hardware</i> y <i>software</i> fiable, asegure que el sistema no sufrirá ninguna pérdida a gran escala de la función de alarma durante la vida útil de la planta. – En caso de accidente, debe estar disponible un nivel mínimo de funcionalidad de la alarma durante y después del accidente.
Apoyar la supervisión del rendimiento del sistema de alarma	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe proporcionar características que permitan la supervisión continua del funcionamiento del sistema de alarma.
Proporcionar información de alarma a otros sistemas y usuarios	<ul style="list-style-type: none"> – El sistema de alarma debe tener disponible la información de alarma y de sucesos para otros sistemas de información.

3.4 USOS DIVERSOS DE LA INFORMACIÓN DE ALARMA

Existe una diversidad de posibilidades para mejorar la eficacia de las alarmas, de forma que proporcionen a los operadores información útil; el examen de estas posibilidades requiere un estudio detallado sobre cómo, los operadores, usan la información y la forma en que la información debe ser presentada (Xiao y Seagull, 1999). La importancia de las múltiples finalidades en el empleo del sistema de alarma ha sido señalada por numerosos investigadores. En este apartado se resume la revisión de la literatura sobre la forma en que los operadores emplean el sistema de alarma, clasificado por Vicente (1996) como usos operacionales.

El estudio de campo realizado por Kragt (1983) y Kragt y Bonten (1983), en una planta de fertilizantes, se centró en el uso que los operadores realizaron de un sistema convencional de alarma. Los operadores, en lugar de monitorizar permanentemente la planta a través de un gran número de

instrumentos, con frecuencia emplearon el sistema de alarma para dirigir su atención a los sucesos de una manera no anticipada por los diseñadores, siendo, además, utilizado para una gran variedad de propósitos, no relacionados con las alarmas, en el sentido de un suceso anómalo. Kragt (1983, p. 28 y p. 39) y Kragt y Bonten (1983, p. 586 y p. 597) afirman que el sistema de alarma se utiliza principalmente “como una herramienta de monitorización y no como un sistema de alarma que requiere una acción”. Los cambios en el estado del proceso (función de atención) y el propio estado (función de memoria) son monitorizados por el operador.

Mumaw et al. (2000), Vicente (2007), Vicente y Burns (1995), Vicente et al. (1997) y Vicente, Roth y Mumaw (2001) documentan las estrategias que utilizan los operadores de centrales nucleares de Canadá para supervisar el estado de la planta en operación normal y, aunque el estudio no se centró exclusivamente en las alarmas, los resultados mostraron que el sistema de alarma tiene un papel muy importante en la monitorización cognitiva del operador. Los operadores parecen apoyarse, en gran medida, en las pantallas de alarmas para detectar problemas. De hecho, incluso se podría decir que, en parte, usan las pantallas de alarmas para obtener una visión general del estado de la planta, una función para la que no fue diseñado (Mumaw et al., 2000; Vicente y Burns, 1995). Los datos revelaron, asimismo, que los operadores de sala de control pueden utilizar el sistema de alarma para evaluar la fiabilidad y el rigor del operador sobre el terreno. Cuando los operadores sobre el terreno desempeñan ciertos trabajos en zona controlada, se generan mensajes de alarma en la sala de control, siendo importante destacar que el momento de aparición de estas alarmas proporciona información relevante, puesto que los operadores de sala de control están familiarizados con el tiempo que se necesita para realizar determinados trabajos en el emplazamiento. De hecho, observaron in situ, en una ocasión, que un operador de sala de control determinó que el operador sobre el terreno no podía haber completado el trabajo asignado en el tiempo que estuvo en zona controlada (Vicente, 2007; Vicente y Burns, 1995). Vicente et al. (2001) también hallaron que un operador empleaba una alarma molesta como un recordatorio para tomar posteriormente alguna acción, por ejemplo, para que el personal de mantenimiento sobre el terreno solucione el problema, para supervisar la variable más de cerca o para solicitar periódicamente una tendencia.

Vicente (1996) argumenta que muchos de los resultados obtenidos por Vicente y Burns (1995) son consistentes con las conclusiones del estudio de campo de Kragt (1983) y Kragt y Bonten (1983), por lo que concluye que los resultados, colectivamente, revelan que los sistemas de alarma son utilizados por los operadores para los siguientes propósitos:

- Detectar anomalías que se produjeron en el proceso (el rol tradicional de un sistema de alarma).
- Determinar si ciertos componentes o subsistemas arrancaron de forma automática, cuando el proceso lo requirió.
- Determinar si las anomalías desaparecieron por sí solas.
- Determinar si las acciones de los operadores obtuvieron los efectos deseados.
- Confirmar que se produjo el evento (anomalía o acción) que el operador esperaba.
- Determinar el momento para llevar a cabo una determinada acción.
- Recordatorio externo para monitorizar estrechamente un determinado parámetro.
- Determinar si un parámetro excede su rango de funcionamiento normal.
- Crear alarmas para los parámetros que no tienen alarmas asociadas.
- Evaluar si un operador de campo ha realizado su tarea.

- Determinar si un operador sobre el terreno ha actuado por iniciativa propia, sin informar al operador de sala de control.
- Determinar la ubicación de un operador de campo.

Davey et al. (1993) argumentan que los operadores confían en la anunciación para alertarles a cambios, inesperados y esperados, en las condiciones de la planta, para gestionar con éxito los sucesos. En el caso de alertas de cambios inesperados en las condiciones de la planta, el objetivo es compensar la inhabilidad de los operadores para mantener una elevada vigilancia en la tarea de monitorización así como para reconocer y hacer un seguimiento de todos los cambios importantes (cuando se originen numerosos cambios). Las alertas, o recordatorio, de los cambios previstos en las condiciones de la planta simplifican las tareas del operador y reducen la carga mental, al no tener los operadores que revisar continuamente los cambios previstos en la planta (Davey et al., 1993).

En la aproximación de U.S. NRC, el NUREG-0700 (NRC, 1996) distingue entre cuatro objetivos de un sistema de alarma: alertar, informar, guiar y confirmar, pero también expone que pueden existir objetivos adicionales: “los operadores usan los sistemas de alarma en modos no siempre previstos por los diseñadores... Por ejemplo, los operadores frecuentemente emplean los sistemas de alarma para determinar el estado global de la planta. El rol específico del sistema de alarma en la planta depende del diseño global de la interfaz persona-sistema, donde el sistema de alarma es sólo una parte. Por ejemplo, el uso de los sistemas de alarma para determinar el estado global de la planta y el estado de los sistemas podría no originarse en plantas avanzadas, ya que éstas disponen de displays del estado general de la planta” (NRC, 1996, p 387). Los operadores utilizan la información de las alarmas de muchas maneras, tales como alertar de una anomalía (Brown et al., 2000; O’Hara, Brown, et al., 1994, 2000), información adicional para ayudar a los operadores en la toma de decisiones (Brown et al., 2000; O’Hara, Brown, et al., 1994), analizar la situación (por ejemplo, para ver la relación entre las alarmas, los componentes, los sistemas y las funciones) (O’Hara et al., 1998; O’Hara, Brown, et al., 2000), planificar la respuesta (por ejemplo, comprobar la disponibilidad de componentes y de sistemas) (Brown et al., 2000; O’Hara et al., 1998; O’Hara, Brown, et al., 1994, 2000; Stubler, O’Hara, Higgins y Kramer, 2000) y para un análisis posterior de la anomalía (O’Hara et al., 1998; O’Hara, Brown, et al., 2000).

En cuanto al uso de las alarmas en ventanillas y las alarmas en listas, en los estudios de U.S NRC, Brown et al. (2000), O’Hara, Brown, et al. (1994) y Stubler, O’Hara, Higgins y Kramer (2000) observaron que los operadores utilizaron las ventanillas del anunciador como una pantalla de visión general, con el objeto de apoyar la planificación de la respuesta. Los operadores aprendieron la ubicación de las ventanillas en los paneles, por lo que podían evaluar rápidamente el estado general de la planta a partir del patrón iluminado de anunciadores. Brown et al. (2000) y Roth y O’Hara (2002) encontraron que los operadores emplearon la lista cronológica de alarmas durante operación normal, la inclusión de los límites de alarma resultó útil para los primeros signos de anomalías de menor importancia, sin embargo en una emergencia, por la cantidad de alarmas, la lista fue ineficaz. Esto ilustra que la información requerida por los operadores y, por lo tanto, la organización preferida de las listas de alarmas, puede ser diferente en condiciones normales y de emergencia (Brown et al., 2000).

El sistema de alarma es la principal fuente de información para la detección de una condición específica fuera de lo normal, pero, sin embargo, en las centrales nucleares convencionales, el sistema de alarma se utiliza también para indicar el estado del sistema o de la función (Brown et al., 2000; Kragt y Bonton, 1983; O’Hara y Brown, 1991; O’Hara et al., 1998; O’Hara, Brown, et al., 2000;

O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Hay alarmas asociadas a acciones del operador, ya que el operador espera que, como consecuencia de una acción, aparecerán determinadas alarmas (Lees, 1983) y, en este papel, también es compatible con una función de retroalimentación del éxito de las acciones tomadas por el operador²² (Brown et al., 2000; Lees, 1983; Niwa y Hollangel, 2001; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Usher y Stallard, 1997), pero si el operador no recibe las señales se sentiría alarmado (Lees, 1983).

Niwa y Hollangel (2001) consideran que el uso de la información de alarmas va más allá de los cuatro objetivos o criterios funcionales de alertar, informar, guiar y confirmar. Y proponen cinco usos principales de la información de alarmas que, encajan en tres objetivos (o funciones), son los siguientes:

- a. Alertar o dirigir la atención. Es la característica comúnmente asociada con las alarmas, también la peor comprendida, porque atrayendo la atención del operador a un nuevo suceso, puede distraerle de las actividades en curso.
- b. Identificar la fuente o la causa. Es un uso en dirección al diagnóstico, ya que implica asunciones sobre las causas probables de la alarma. Resulta atractivo y útil ampliar la función de la alarma en esta dirección, sobre todo por las capacidades ofrecidas por las tecnologías de información avanzadas. No obstante, introduce cambios en las responsabilidades y en las tareas del operador, que pueden reducir la habilidad del operador para mantener el control del proceso.
- c. Identificar la situación e indicar la respuesta adecuada. Dirigir a un procedimiento, cuando la alarma represente una condición del proceso para la que exista un procedimiento específico. En este caso, las funciones de identificación y de diagnóstico están casi completamente automatizadas, con el riesgo de que el operador se sienta obligado a seguir el asesoramiento sin comprender bien la causa o las consecuencias.
- d. Mostrar una tendencia o un cambio de dirección. Las alarmas se usan como medidas graduadas o indicadores de estado, o para confirmar la exactitud de una respuesta, porque la respuesta tiene consecuencias específicas y visibles cuando se corrige la desviación.
- e. Indicar o recordar los objetivos activos, pero no cumplidos. Las alarmas se pueden emplear como recordatorio de las cosas que necesitan hacerse, de sucesos que han ocurrido, y que todavía pueden requerir la atención del operador. En principio, una alarma indica un estado o un cambio en el proceso que requiere atención. Proporciona un tipo de función de contabilidad del sistema, es una representación externa de lo que hay que hacer, frente a una representación interna que depende del recuerdo de los operadores. Las alarmas activas muestran lo que está sucediendo, lo que ha ocurrido, pero no necesariamente lo que ocurrirá.

Niwa y Hollnagel (2001) proponen que la información proporcionada por el sistema de alarma (específicamente por los anunciadores) en las tareas de control del proceso se puede emplear con tres objetivos diferentes, que son parcialmente independientes unos de otros, tal y como se muestra en la figura 3-1, indicación del estado de la anomalía, indicación del estado del proceso y recordatorio:

- Indicación del estado de la anomalía. La información del sistema de alarma se puede emplear como indicador de un estado anómalo del sistema. Se corresponde con la utilización de las alarmas descrita en el NUREG-0700. Comprende los usos a, b, c y d.

²² Correspondería al criterio funcional de confirmar de Rankin et al. (1983).

- Indicación del estado del proceso. La información del sistema de alarma se puede usar como un indicador de estado del proceso (mostrar una tendencia o cambio de dirección), específicamente las evoluciones temporales debidas a los cambios en los anunciadores. Complementa al primer uso, como un modo de confirmar la adecuación de las respuestas realizadas por el operador. Comprende el uso d.
- Recordatorio. La información de alarma se puede emplear como recordatorio de lo que hay que hacer. Es consistente con la configuración de panel oscuro: no habrá alarmas activas cuando la planta se encuentre en estado normal, por ejemplo, en operación a plena potencia con todos los sistemas en su configuración habitual. Comprende el uso e.

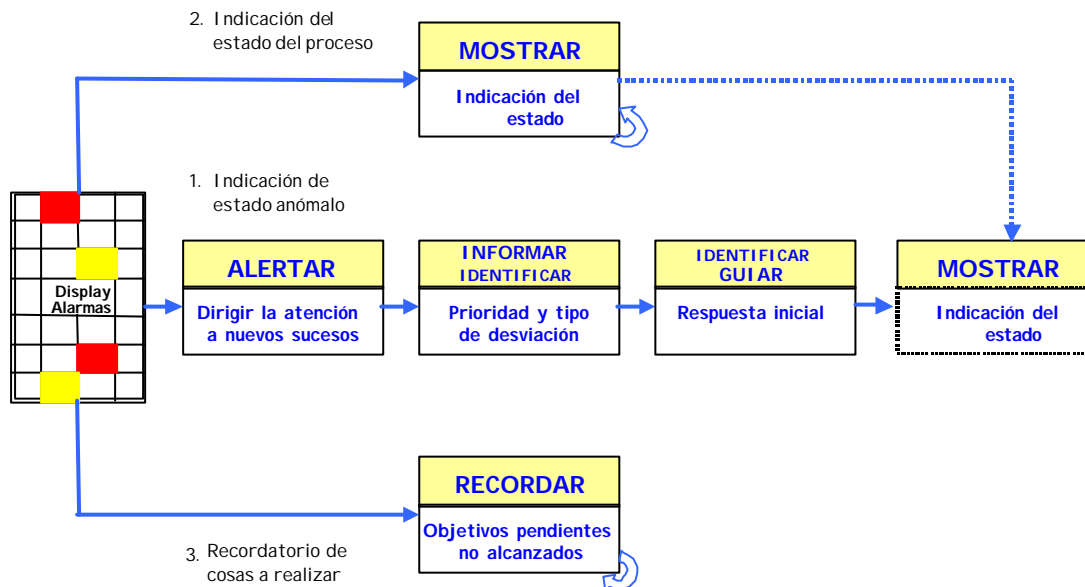


Figura 3-1. Usos de la información de alarma (Niwa y Hollnagel, 2001).

El concepto de panel oscuro en el diseño del sistema de alarma se basa en una *característica emergente* (O’Hara, Brown, et al., 1994; O’Hara, Higgins y Kramer, 2000). Características emergentes son “las características perceptivas de alto nivel, globales que se producen por las interacciones entre las partes o los elementos gráficos de una pantalla (por ejemplo, líneas, contornos y formas)” (Bennett, Toms y Woods, 1993, p. 73; EPRI, 2004, p. 4124); las características emergentes “dependen de la identidad y la disposición de las partes, pero no son identificadas con una única parte” (Pomerantz, 1986, p. 8, citado en Bennett, Toms y Woods, 1993). El concepto de panel oscuro significa que cuando todos los parámetros en alarma están dentro del rango de operación normal, no puede haber alarmas iluminadas (en un panel convencional) o no aparecerán mensajes en las pantallas de visualización de alarmas (EPRI, 2005; O’Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O’Hara, Higgins y Kramer, 2000). Cuando el sistema de alarma está diseñado de esta manera, los operadores pueden “determinar de un vistazo” en la pantalla de alarma la aceptabilidad general del rendimiento global de la planta, debido a que la característica emergente transmite eficazmente información de alto nivel, sin ser necesario que los operadores analicen los parámetros individuales (O’Hara, Higgins y Kramer, 2000).

El sistema de alarma en una central de energía nuclear es el sistema principal de la planta para definir los estados y las condiciones normales y anómalas (EPRI, 2006), siendo la monitorización y la

detección el propósito principal de un sistema de alarma (EPRI, 2003e, 2004a, 2005). El sistema de alarma también se utiliza para otros fines, tales como:

- Proporcionar una evaluación general del estado de la planta, en gran parte, por la presencia o ausencia de alarmas en los sistemas clave (EPRI, 2003e, 2004a, 2005).
- Determinar la disponibilidad de sistemas y componentes, de nuevo, en gran medida por la ausencia de alarmas (EPRI, 2003e, 2004a, 2005; MPR Associates, 1985).
- Diagnóstico de transitorios y sucesos (EPRI, 2003e, 2004a, 2005, 2006).
- Apoyo a las pruebas y al mantenimiento, por ejemplo, pruebas de vigilancia (EPRI, 2003e, 2004a, 2005).
- Gestión de incidentes (EPRI, 2006).

Chériaux et al. (2010, 2011) y EPRI (2006) sostienen que los operadores utilizan las alarmas principalmente para monitorizar el estado de la planta y detectar problemas que requieran acción. El sistema de alarma se utiliza para transitorios normales y anomalías que suceden en la central nuclear. En el caso de incidentes operativos, proporciona alertas que requieren la acción del operador. En el caso de un suceso anómalo o accidente, hay que seleccionar, a partir de un análisis de la alarma, el procedimiento correcto de operación.

Xiao y Seagull (1999) señalan que la función de las alarmas no debe ser relegada a la simple tarea de una advertencia de peligro, de alertar, de llamar la atención. Las alarmas tienen distintas funciones, tales como indicadores de estado, interrupciones, ayudas para las limitaciones humanas y fuente para guiar la solución de problemas, que deben ser consideradas en el diseño de los sistemas de alarma. Los operadores necesitan asistencia de las alarmas para la gestión de la atención, como, por ejemplo:

- Displays de estado: display audible del estado del proceso que supervisa.
- Interrupciones: un recordatorio para hacer o comprobar algo, una fuente del funcionamiento del sistema, una indicación de retroalimentación de la acción, una alerta de cambio de estado, una advertencia de peligro y la dirección de la atención al diagnóstico de fallos.
- Ayudas destinadas a mejorar las limitaciones humanas en: la memoria a corto plazo (seguimiento de actividades y sucesos múltiples), la memoria a largo plazo (interpretación de la importancia de la señal en términos de fiabilidad y de velocidad del recuerdo), la capacidad de razonamiento (sólo se considera un pequeño número de factores), la atención (sólo atiende a un pequeño número de canales de información), la capacidad de atención sostenida (la capacidad de vigilar durante un corto período de tiempo).
- Directrices que pueden ser entendidas, usando el marco de Rasmussen (1983), para ayudar al comportamiento basado en el conocimiento (algo anda mal aquí, por favor, diagnostica y evalúa la estabilidad del sistema), comportamiento basado en reglas (al escuchar un determinado sonido para un componente) y comportamiento basado en destrezas (modula la entrada según la tasa del sonido de alarmas audibles).

3.4.1 Implicaciones y resumen de los usos de las alarmas

Las diferentes aproximaciones descritas en esta sección llevan a la conclusión de que el uso polifacético de las alarmas difiere considerablemente de las definiciones consideradas para el diseño del sistema de alarma, esto es, los operadores emplean los sistemas de alarma para fines no previstos

por los diseñadores²³ (Beattie et al., 1996; Brown et al., 2000; Kragt, 1983; Kragt y Bonten, 1983; Moum, Førdestrømmen y Saarni, 1998; Mumaw et al., 2000; Niwa y Hollnagel, 2001; NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000; Vicente, 1996; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 1997).

Entre los factores que influyen en el papel y el uso de las alarmas destacan la tecnología empleada en el sistema de alarma (sistema independiente en la sala de control convencional frente a sistema integrado en la sala avanzada) (Brown et al., 2000; NRC, 1996; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Vicente, 1996) y el estado de operación de la planta (operación normal frente a anomalías, accidentes y emergencias) (Chériaux et al., 2010, 2011; EEMUA, 1999; EPRI, 2006; Marshall y Baker, 1994; Roth y O'Hara, 2002; Vicente, 1996).

Como consecuencia, cabe señalar que los roles específicos que cumple un sistema de alarma en una planta dependen del diseño general de la interfaz, en donde el sistema de alarma es sólo una parte (Brown et al., 2000; O'Hara, Brown, et al., 1994). Además, la necesidad de disponer de diferentes tipos de alarmas en distintos estados operacionales de la planta, implica que el sistema de alarma sea sensible al contexto, teniendo en cuenta los estados operacionales para determinar las señales que generan alarmas (Alm y Osvalder, 2011; Bransby y Jenkinson, 1998b, 1998c; Brown et al., 2000; Davey et al., 1995; EEMUA, 1999; EPRI, 2005; Errington et al., 2004; IAEA, 2001; Koene y Vedam, 2000; Lees, 1983; Mumaw et al., 2000; NPD, 2001; Sørenssen et al., 2002; Stanton, 1994a, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Vicente, 2007; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 1997, 2001; Woods et al., 1987).

De los estudios descritos en este apartado se puede concluir que muchos de los propósitos no están asociados con sucesos fuera de lo normal, destacando numerosos autores la monitorización de la planta durante operación normal, que ayuda a los operadores a actualizar la situación de la planta (Beattie et al., 1996; Chériaux et al., 2010, 2011; Davey, 2000; De Keyser y Nyssen, 2001; EPRI, 2006; Kragt, 1983; Kragt y Bonten, 1983; Mumaw et al., 2000; Niwa y Hollnagel, 2001; Vicente, 1996, 2007; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 1997, 2001). Los operadores no sólo responden a las alarmas, sino que activamente las anticipan y continuamente ajustan su comportamiento para equilibrar las demandas y las capacidades (Niwa y Hollnagel, 2001). De Keyser y Nyssen (2001) sostienen que los operadores anticipan más del 50% de las alarmas.

La multiplicidad de usos de las alarmas, más allá de su función primaria de alertar, tiene que ser considerada en el diseño del sistema de alarma y en su integración en la forma de presentación de otra información en la sala de control (Beattie et al., 1996; Niwa y Hollnagel, 2001; NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994; Vicente, 1996). Asimismo, los diferentes objetivos y usos de los sistemas de alarma en condiciones normales y de emergencia se deben considerar de manera explícita en el diseño y en la evaluación de los sistemas de alarma (Brown et al., 2000; Roth y O'Hara, 2002).

²³ Esto sucede de forma general con los sistemas automatizados, en donde los operadores en ocasiones realizan un mal uso (se refiere a un exceso de confianza en la automatización, lo que puede dar lugar a fallos de monitorización o a sesgos en la toma de decisiones) o un desuso del sistema (desatención o infrautilización de la automatización, comúnmente causado por falsas alarmas, por lo que ignoran o desconectan las alarmas), contribuyendo, de forma relevante, el factor de la confianza en la interacción persona-automatización (Parasuraman y Riley, 1997; Parasuraman y Wickens, 2008).

3.5 LAS FUNCIONES DEL SISTEMA DE ALARMA

El uso de las alarmas en el control de procesos es complejo, puesto que las alarmas tienen diferentes funciones, como se expone a continuación, estando formalmente aceptado que la función fundamental consiste en alertar a los operadores de un nuevo suceso, como hemos expuesto en las secciones previas. EPRI (2006) y Chériaux et al. (2010, 2011) defienden que, probablemente, el principal problema en el diseño del sistema de alarma está relacionado con la determinación de las funciones del sistema de alarma.

La clasificación más habitual de las funciones del sistema de alarma está establecida en primaria y secundarias (Bransby y Jenkinson, 1998a; Chériaux et al., 2010, 2011; EEMUA, 1999; EPRI, 2003e, 2004a, 2005, 2006; IEC, 2004; Jang, Keum, Park y Kim, 2008; Kragt y Bonton, 1983; Lees, 1983; NPD, 2001; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Veland, Kaarstad, Seim y Førdestrømmen, 2001).

Niwa y Hollnagel (2001) proponen una clasificación, basada en el uso del sistema de alarma, dividida en indicación del estado de la anomalía, del proceso y recordatoria (ver figura 3-1).

3.5.1 Función primaria y funciones secundarias del sistema de alarma

Existe en general consenso en la literatura con respecto a que la función principal del sistema de alarma está en atraer y dirigir la atención del operador hacia un suceso anómalo. El sistema de alarma presenta también funciones secundarias, que apoyan a la función primaria, como, por ejemplo, proporcionar un registro de las alarmas anunciadas.

3.5.1.1 Función primaria del sistema de alarma

El sistema de alarma ayuda al operador a gestionar sus tareas y recursos, es decir, a gestionar su tiempo y a focalizar su atención en los aspectos más importantes. El sistema de alarma indica al operador “haz algo con urgencia en relación con esto”, “mira a esto rápidamente” o “no olvides este problema” (Bransby y Jenkinson, 1998a; EEMUA, 1999). Bransby (1998b) y Bransby y Jenkinson (1998a) exponen que el sistema de alarma está diseñado para dirigir la atención del operador a los aspectos significativos del estado actual de la planta, siendo vital que cualquier interpretación de esta definición incluya el reconocimiento de las limitaciones humanas del operador. Posteriormente, Bransby (2001) y EEMUA (1999) matizan que el objetivo de un sistema de alarma es dirigir la atención del operador a las condiciones de la planta que requieren el análisis o la acción puntual.

EEMUA (1999) describe la alarma en base a la función primaria del sistema; el concepto de alarma de EEMUA ha sido anteriormente revisado:

- Cada alarma debería alertar, informar y guiar. La alarma tiene que mostrar información que defina qué constituye el problema y, también, información con guías para responder a la alarma, tales como procedimientos escritos o ayuda a seleccionar por el operador. El sistema de alarma, además, debería proporcionar retroalimentación al operador sobre el éxito de las acciones tomadas en respuesta a la alarma²².
- Cada alarma presentada debería ser útil y relevante para el operador, evitando que el operador dedique tiempo a decidir si puede ignorar la alarma.

- Cada alarma (o combinación de alarmas) debería disponer de una respuesta claramente definida, para asegurar que la alarma es útil. Además, la respuesta definida para cada alarma suele emplearse para redactar los procedimientos de respuesta a la alarma y como material para la formación de los operadores.
- El sistema de alarma debería proporcionar tiempo suficiente para que el operador lleve a cabo la respuesta definida.

O'Hara y Brown (1991) y O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) consideran que el sistema de alarma es la principal fuente de información para la detección de una condición específica fuera de lo normal.

El estándar IEC 62241 (IEC, 2004) describe que el sistema de alarma deberá detectar cambios en el estado de la planta para obtener las señales de alarma, y el posterior procesamiento de la señal de alarma y de la presentación de la alarma. Las alarmas deben proporcionar al operador una advertencia e indicación sobre la aparición de un reto a la seguridad o accidente, alteración de la planta, fallos de la planta o del equipo u otros eventos, que podría prevenir el alcanzar los objetivos operacionales. El estándar IEC 62682 (IEC, 2014) considera que la función primaria es notificar a los operadores las condiciones del proceso anormales o el funcionamiento erróneo del equipo y apoyar la respuesta.

La función primaria de un sistema de alarma es advertir al operador sobre una situación que no es normal (Jang, Keum, et al., 2008; NPD, 2001; Skraaning y Andresen, 1999). NPD (2001) considera que el sistema debería informar al operador sobre las condiciones de la planta que requieren una evaluación puntual y, posiblemente, la acción correctiva para mantener los objetivos de la planta en términos de seguridad, productividad, entorno y eficiencia. Y, más específicamente, las funciones de alarma deberán proporcionar, al menos, las siguientes características fundamentales (IEC, 2004; Jang, Keum, et al., 2008; NPD, 2001): alertar, informar y guiar¹⁹.

EPRI (2003e, 2004a) describe que las funciones generales del sistema de alarma son: alertar, informar, guiar y confirmar, conforme a los criterios funcionales de Rankin et al. (1983). Posteriormente, EPRI (2006) establece cinco funciones de las alarmas, similares a las descritas en EPRI (2003e, 2004a), desglosadas de distinta manera, separadas en tres primarias y dos secundarias. Supeditando la presentación de las alarmas en PVD a la función que éstas cumplan: las alarmas más importantes en una pantalla de alarma continuamente visible (EPRI, 2006) y especialmente dedicada (EPRI, 2003e). Las funciones primarias de EPRI (2006) consisten en:

- Informar al operador de que existen condiciones normales en la planta. No se origina ninguna alarma, implica la aplicación del criterio de panel oscuro, concepto explicado anteriormente.
- Alertar al operador de un fallo que requiere acción y guiar la respuesta.
- Informar al operador sobre una condición de operación accidental y guiar al procedimiento de operación de accidente más apropiado.

Chériaux et al. (2010, 2011) destacan que la función primaria y principal de un sistema de alarma es alertar al operador de la existencia de estados anómalos, de modo que pueda iniciar la acción correctiva adecuada, esto es, guiar la acción requerida de los operadores. H. C. Lee et al. (1998) también consideran que la función principal del sistema de alarma en una central nuclear es alertar a los operadores de anomalías en la planta; los sistemas de alarma avanzados persiguen proporcionar a los operadores información procesada de la alarma con la que puedan estar al tanto de la condición de la planta, de forma rápida y correcta.

3.5.1.2 Funciones secundarias del sistema de alarma

Además de la anteriormente definida función primaria, el sistema de alarma tendrá una o varias funciones secundarias, varía en función de los autores.

La función secundaria consiste en proporcionar un registro de alarmas (EEMUA, 1999), un registro de todos los sucesos significativos de la planta (Bransby y Jenkinson, 1998a; IEC, 2014) o un registro de alarmas y de sucesos (IEC, 2014; Jang, Keum, et al., 2008; NPD, 2001; Skraaning y Andresen, 1999; Veland et al., 2001), que se puede emplear para el análisis de incidentes, para optimizar la operación de la planta y para el seguimiento y la mejora del rendimiento del sistema de alarma (EEMUA, 1999; Jang, Keum, et al., 2008; NPD, 2001). Jang, Keum, et al. (2008) enfatizan que el registro de alarmas debe ser flexible y contener también sucesos, alarmas suprimidas y otra información no presentada en la lista principal de alarmas, que podría resultar útil para la investigación posterior del incidente.

Stanton (1994b) y Stanton y Booth (1990) enumeran una variedad de roles, con funciones adicionales a llamar la atención, para los que puede servir un sistema de alarma (ver p. 53).

Bransby y Jenkinson (1998a) encuentran otra función secundaria relativa a informar a ingenieros y al personal de mantenimiento.

Para el estándar IEC 62241 (IEC, 2004), el diseño de la presentación del sistema de alarma debe tener en cuenta las siguientes funciones complementarias:

- Proporcionar a los operadores información sobre las causas y las consecuencias de los sucesos.
- Dirigir a los operadores a los puntos de entrada en el sistema de información de la sala de control.

Mientras que la monitorización y la detección constituye el propósito principal de un sistema de alarma, también tiene dos funciones secundarias (EPRI, 2006), que necesitan mecanismos de procesamiento y de presentación específicos: en una pantalla de alarma secundaria (a menudo una lista cronológica) e independiente de la pantalla de función primaria (EPRI, 2006). Las dos funciones secundarias de EPRI (2006) son:

- Proporcionar al operador una visión general del estado de la planta y de los sistemas (por la presencia o ausencia de alarmas en los sistemas clave), e informar sobre fallos en toda la planta.
- Guiar al operador en el diagnóstico de las condiciones de fallo, transitorios y sucesos.

Chériaux et al. (2010, 2011) consideran las mismas funciones secundarias del sistema de alarma que EPRI (2006), definidas de la siguiente forma:

- Informar al operador sobre fallos, anomalías y sucesos fuera de lo normal que conducen a un cambio de estado de los sistemas de la planta.
- Guiar al operador en el diagnóstico y la comprensión de las condiciones de fallo.

3.5.1.3 Resumen de las funciones del sistema de alarma

El sistema de alarma de una central nuclear tiene diversas funciones, existe consenso en la literatura que la función primaria es ayudar al operador a la detección de un estado anómalo de la planta, lo que es lo mismo, atraer y dirigir la atención del operador a la desviación, a las condiciones

de la planta que requieren algún tipo de respuesta (Bransby, 1998b; Bransby y Jenkinson, 1998a; Chériaux et al., 2010, 2011; EEMUA, 1999; EPRI, 2006; IEC, 2004; Jang, Keum, et al., 2008; H. C. Lee et al., 1998; NPD, 2001; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). No obstante, existen también funciones, que van más allá de alertar para detectar anomalías. Numerosos autores adoptan los cuatro criterios funcionales de Rankin et al. (1983, 1985): alertar, informar, guiar y confirmar. Entre las principales funciones secundarias destaca el registro de sucesos y de alarmas que sirven para el análisis posterior del suceso (Bransby y Jenkinson, 1998a; EEMUA, 1999; IEC, 2014; Jang, Keum, et al., 2008; NPD, 2001; Skraaning y Andresen, 1999; Veland et al., 2001).

De la revisión del estado del arte, una de las conclusiones más importantes que obtenemos es la relevancia de la definición de lo que es una alarma, de sus funciones, y la importancia de diseñar inicialmente una filosofía del sistema de alarma, que contemple las distintas funciones que abarca, ya que no resulta suficiente con que el sistema alerte al operador de la existencia de una desviación.

3.5.2 Funciones de la anunciación

Davey et al. (1992) identificaron, a partir documentación y experiencia operativa y de diseño, un conjunto de veinticinco funciones de la anunciación, con un propósito o un objetivo. Luego vincularon las funciones de la anunciación con las tareas operacionales; cada tarea estaba apoyada por varias funciones. Clasificaron las tareas operacionales en las fases de toma de decisiones, en función de la tarea predominante:

- Detección. La atención del usuario se desvía hacia una anomalía o un suceso.
- Identificación. Análisis para identificar el estado actual de la planta, la causa y la consecuencia de la anomalía.
- Planificación. Diferentes grupos planifican las acciones correctivas y toman decisiones sobre la necesidad de acciones de recuperación, inmediatas o retardadas.
- Ejecución. Las acciones previstas son ejecutadas y supervisadas para confirmar su éxito.

Quince de las veinticinco funciones están comprendidas en las fases de toma de decisiones de detección y de identificación (tabla 3-3). El papel funcional constituirá una base sólida para el diseño de mejores arquitecturas de anunciación en plantas modernizadas y en nuevos diseños.

Tabla 3-3. Resumen de las Funciones de la Anunciación (Davey et al., 1992)

Tareas en Fases	Funciones de la Anunciación
Detección	<p>Informar a los usuarios de las desviaciones que se han producido en la planta que afecten, o puedan afectar, a los objetivos operacionales de la planta.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dirigir la atención del usuario a anomalías del sistema y del equipo. - Dirigir la atención del usuario a la ocurrencia de un evento. - Ayudar a los usuarios a hacer el seguimiento de la ejecución de las acciones automáticas. - Alertar a los usuarios de valores indeseados y de las tendencias de parámetros críticos de seguridad. - Alertar a los usuarios de la inminente pérdida de producción. - Alertar a los usuarios de la inminente pérdida de las funciones principales de la planta. - Alertar a los usuarios de la inminente anomalía de equipos y sistemas.
Identificación	<p>Dirigir a los usuarios a información para evaluar la gravedad de la anomalía.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mejorar la capacidad del usuario para comprender el estado del proceso, incluyendo las situaciones con transitorios rápidos. - Apoyar a los usuarios a asociar firmas de alarmas con los sucesos. - Indicar alarmas causadas por el mal funcionamiento de la instrumentación.

Tareas en Fases	Funciones de la Anunciación
	<ul style="list-style-type: none"> - Ayudar a identificar la causa raíz de la anomalía. - Alertar a los usuarios de la falta de disponibilidad de un sistema inactivo (latente). - Ayudar a los usuarios a determinar el estado del sistema y de los equipos. - Apoyar a los usuarios en el manejo de las condiciones que exceden las bases de diseño de la planta. - Apoyar a los usuarios en el manejo de las condiciones que pueden resultar en el incumplimiento de los reglamentos de la licencia de operación.
Planificación	Dirigir a los usuarios a información para determinar las acciones correctivas. <ul style="list-style-type: none"> - Predecir los efectos que las acciones del usuario pueden tener sobre los aspectos de seguridad y de producción de la planta. - Guiar a los usuarios en la selección de los procedimientos de operación aplicables. - Proporcionar medios para resumir datos que apoyen la comunicación entre los diferentes usuarios.
Ejecución	Ayudar en las acciones de coordinación y confirmar que las acciones han corregido las desviaciones. <ul style="list-style-type: none"> - Apoyar el trabajo en equipo en la ejecución de las acciones. - Alertar a los usuarios de la selección de equipos fuera de lo normal. - Anunciación del éxito o fracaso de las acciones del operador. - Registrar la secuencia de los acontecimientos. - Apoyar a los operadores en las situaciones posteriores a un accidente. - Apoyar a los usuarios en las pruebas de sistemas y equipos. - Apoyar la puesta en marcha de los sistemas.

Posteriormente, Davey y Lane (2001) definieron los requisitos funcionales de la anunciación con respecto a sus cuatro funciones principales o primarias: detectar, alertar, presentar información y dirigir y proporcionar (ver tabla 3-4). Los requisitos se presentan en forma de declaraciones simplificadas de las necesidades del usuario.

Tabla 3-4. *Requisitos Funcionales de la Anunciación (Davey y Lane, 2001)*

Funciones	Categoría y Declaración Simplificada del Requisito
Detección	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Cobertura</i>. Proporcionar alarmas en todas las condiciones de seguridad y de producción. - <i>Tiempo de referencia</i>. Indicar el tiempo de ocurrencia de todos los cambios de estado de las alarmas. - <i>Detección del estado</i>. Detectar y determinar continuamente el estado de la planta. - <i>Validación</i>. Determinar la validez de las alarmas (detección de fallos).
Alertar	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Filtrado de relevancia</i>. Determinar la relevancia y el filtrado por el estado de planta. No alertar a los usuarios a alarmas irrelevantes. - <i>Supresión de alarmas molestas</i>. Suprimir alertas repetidas debidas a alarmas molestas. - <i>Eliminación de alarmas por el usuario</i>. Permitir al usuario seleccionar las alarmas. - <i>Prominencia</i>. Proporcionar señales de alerta que garanticen dirigir la atención. - <i>No molestar</i>. Proporcionar señales de alerta no molestas.
Presentación. Procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Importancia</i>. Determinar la prioridad de la alarma en función del estado de planta, la consecuencia de la condición y el tiempo para responder.
Presentación. Propiedades de alarma	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Identificación del cambio</i>. Identificar el cambio de estado de la alarma. - <i>Fallo/Estado</i>. Identificar el tipo de alarma – fallo o estado. - <i>Estado de la condición</i>. Identificar el estado de las alarmas activas. - <i>Importancia</i>. Identificar la importancia de la alarma. - <i>Afiliación</i>. Identificar la afiliación funcional/sistema de la alarma. - <i>Formato del mensaje</i>. Estandarizar los formatos y los contenidos de los mensajes. - <i>Validez</i>. Identificar la validez de la alarma.
Presentación. Displays primarios	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Panel oscuro</i>. Configurar las alarmas para que no alarmen en condiciones de operación normal. - <i>Orden de fallo</i>. Organizar las alarmas según su importancia relativa. - <i>Orden de estado</i>. Organizar las alarmas de estado por orden de aparición.
Presentación. Displays de apoyo	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Intervalo de visión</i>. Proporcionar la capacidad de ver todas las alarmas activas. - <i>Recuperación de históricos</i>. Proporcionar la capacidad de revisar los históricos de alarmas. - <i>Soporte de tareas</i>. Proporcionar pantallas de alarma adaptadas a las necesidades de la

Funciones	Categoría y Declaración Simplificada del Requisito
	tarea.
	- <i>Personalización del usuario.</i> Proporcionar la capacidad para que los usuarios personalicen las pantallas.
Presentación. Fallos del sistema	- <i>Observar.</i> Asegurar que los fallos del sistema son fácilmente identificables.
Dirigir y proporcionar	- <i>Directriz directa.</i> Proporcionar vinculación directa de la alarma a la directriz de respuesta.
	- <i>Respuesta.</i> Asegurar que hay una respuesta completa para cada alarma.

4 **APROXIMACIÓN REGULADORA, NORMATIVA Y PRÁCTICA RECOMENDADA PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS FACTORES HUMANOS EN LA INTERFAZ**

La aproximación seguida para la incorporación de los factores humanos en la interfaz persona-sistema está descrita en esta sección. El desarrollo de la interfaz de los sistemas de alarma, en paneles anunciadores o en pantallas de visualización de datos, debe tener en cuenta al usuario final: el operador. Para ello, es necesario un buen entendimiento del modelo mental del usuario, así como de sus habilidades psíquicas, físicas y psicológicas (Martínez y Cueva, 2001). Con este objeto, se han desarrollado principios, estándares, directrices de diseño y guías de estilo, aplicables tanto al diseño del *hardware* y del *software* como a la interfaz, en diversos ámbitos de aplicación.

En esta sección se presenta los conceptos de principios, directrices, estándares y guías de estilo, cubriendo el área de los factores humanos y la ergonomía, las salas de control y los sistemas de alarma, mostrando ejemplos de cada uno de ellos.

4.1 PRINCIPIOS

Un principio es una sentencia en un sentido muy amplio, normalmente basada en investigación sobre la forma de aprender y de trabajar de las personas (Martínez y Cueva, 2001). Los principios son abstractos, están basados en ideas de alto nivel, siendo de aplicación muy general.

Shneiderman (1992), en el capítulo 2 sobre teorías, principios y directrices, recoge los principios generales para el diseño de sistemas, descritos a continuación en la tabla 4-1.

Tabla 4-1. *Principios Generales para el Diseño de Sistema (Shneiderman, 1992)*

Principio	Descripción del Principio General del Diseño de Sistema
Reconocer la diversidad	Antes de comenzar un diseño, de la forma más completa y precisa posible, se debe realizar la caracterización de los usuarios, de las tareas a realizar y de la forma de interactuar.
Reglas de oro para el diseño de los diálogos	Las ocho reglas a emplear en el diseño de la interfaz son las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> – Consistencia. – Permitir atajos a los usuarios experimentados. – Proporcionar realimentación informativa para cada acción. – Diseñar diálogos que permitan proporcionar realimentación cuando se completen las secuencias de las acciones. – Ofrecer una forma sencilla de gestionar los errores. – Permitir que se puedan deshacer acciones. – Apoyar el control del sistema por parte del usuario. – Reducir la carga de la memoria a corto plazo.
Prevenir los errores	Prevenir los errores antes de que ocurran, por medio de técnicas como el uso de secuencias completas de acciones.

Un ejemplo de principios generales de factores humanos que mejoran el diseño de las pantallas y la interacción persona-sistema se presentan en la tabla 4-2, que está adaptada de Salvendy (1987) (Førdestrømmen, Moum y Torralba, 1994).

Tabla 4-2. *Principios Generales de Factores Humanos Importantes para el Diseño del Sistema de Alarma* (Førdestrømmen et al., 1994)

Principio	Descripción del Principio General de Diseño de Sistemas de Alarma
Disponibilidad	Mostrar la información que sea requerida por los operadores.
Exactitud	La pantalla muestra la información requerida por los operadores sin ambigüedad o pérdida de significado. La información presentada es claramente comprensible en cualquier situación operacional.
Visibilidad	La información de alarmas se presenta de forma fácilmente detectable por los operadores. La alarma atrae la atención de los operadores. Tres factores principales determinan la cantidad de atención: prominencia o importancia, novedad y relevancia.
Legibilidad	Los cambios en las pantallas de las alarmas son fácilmente detectables desde las posiciones normales de trabajo de los operadores. Por ejemplo, el tamaño de textos y símbolos es suficientemente grande para ser leído con facilidad.
Inteligibilidad	Claridad del contenido del mensaje a transmitir. Empleo del menor número de palabras posibles (principio de brevedad), minimizar el uso de acrónimos y abreviaturas.
Consistencia	Estandarización de las pantallas. Minimizar las diferencias de diálogo dentro del sistema de alarma avanzado, y de éste con respecto al sistema de alarma convencional existente en el simulador. Usar, siempre que existan, símbolos y palabras estándar.
Compatibilidad	Minimizar la cantidad de recodificación de información que los operadores tienen que realizar. El diseño de la interfaz es compatible con las capacidades y limitaciones de los operadores en atención, percepción, memoria, resolución de problemas, acción y comunicación. Emplear el vocabulario y el lenguaje adecuado a los usuarios.
Estructura	Asistir a los operadores a desarrollar una representación conceptual de la estructura del sistema, de modo que puedan navegar a través de la interfaz.
Memoria	Minimizar la cantidad de información que el usuario debe mantener en la memoria a corto plazo, ya que ésta tiene una limitada capacidad. La suma máxima de información que puede ser mantenida en la memoria a corto plazo está entre 5 y 9 ítems (7 ± 2). Por otro lado, considerar las implicaciones del efecto de posición serial (los efectos de primacía y recencia) cuando se construyen los mensajes de alarma. Lo que significa que los sujetos recuerdan más fácilmente los datos del principio y del final que los del medio.
Carga de Trabajo	Considerar cuidadosamente las demandas que impone el sistema sobre las capacidades limitadas del operador, intentando mantener la carga mental dentro de los límites aceptables en la definición de los diálogos requeridos por el operador. La existencia de carga cognitiva puede dar lugar a que se realice un análisis erróneo de la situación, y, por tanto, ejecutar respuestas incorrectas o fallar al responder ante anomalías o emergencias. Por lo que la probabilidad de fallo o error humano en situaciones de sobrecarga o infracarga aumentaría. La información presentada en pantalla estará organizada para minimizar el tiempo de búsqueda requerido por el usuario. Se presentará sólo la información esencial para las necesidades actuales de los usuarios.
Retroalimentación	Los usuarios serán conscientes en todo momento de dónde están, la acción que han realizado y si ésta ha tenido éxito. La retroalimentación del sistema proporcionará al usuario la seguridad de que el sistema está disponible.

En cuanto a principios de sistemas de alarma en centrales nucleares, EEMUA (1999) destaca cuatro principios clave del sistema de alarma: facilidad de uso, seguridad, control del rendimiento e inversión en ingeniería, descritos en la tabla 4-3.

Tabla 4-3. *Cuatro Principios Clave del Sistema de Alarma (EEMUA, 1999)*

Principio	Descripción del Principio Clave del Sistema de Alarma
Facilidad de uso	El sistema de alarma estará diseñado para satisfacer las necesidades de los usuarios y operar dentro de sus capacidades. Por consiguiente, la información que el sistema de alarma muestra debería: 1) ser relevante al rol del usuario en cada momento, 2) indicar claramente la respuesta requerida, 3) ser presentada a una tasa que el usuario pueda afrontar y, 4) ser fácil de entender.
Seguridad	El sistema de alarma contribuirá a proteger la seguridad de las personas, del entorno y del equipo de planta. Los requisitos de respuesta del operador a la alarma se basarán en datos y principios fundados de factores humanos.
Control del rendimiento	Hay que evaluar el sistema de alarma durante el diseño y la construcción para asegurar que es útil y efectivo en todas las condiciones de operación. Realizar auditorías regulares durante el ciclo de vida, para asegurar su operatividad. Requerir una implicación real y continuada de los gestores con más antigüedad de la planta.
Inversión en ingeniería	Tiene que cumplir los estándares. Cuando se desarrolle un nuevo sistema de alarma, o se modifique un sistema existente, se seguirá una metodología estructurada, justificando cada alarma.

Rothenberg (2009a) recoge tres principios funcionales del sistema de alarma, coincidentes en gran parte con los principios proporcionados por EEMUA 191 (EEMUA, 1999):

- Cada alarma presentada al operador debería ser útil y relevante. La acción prevista debe ser necesaria para la operación prudente y eficaz de la planta.
- Cada sistema de alarma debería estar explícitamente diseñado para considerar las limitaciones humanas. El sistema de alarma debe ser lo suficientemente robusto para proporcionar un nivel de redundancia que permita al operador realizar los errores o las equivocaciones comunes.
- El sistema de alarma es una parte clave de las operaciones seguras. El sistema de alarma permanecerá en buen estado de funcionamiento y estará adecuadamente integrado en la infraestructura de la planta.

Los principios rectores para la anunciación, establecidos por Davey et al. (1995), son los siguientes:

- La información debe ser proporcionada en el contexto situacional.
- El contexto se basará en el estado físico de la planta.
- La importancia de la información presentada debe ser coherente con las necesidades del operador y del contexto situacional.
- Suprimir la información que no sea operacionalmente relevante.
- Toda la información, relevante e irrelevante, debe estar disponible bajo demanda.
- Se debe proporcionar apoyo directo a las tareas del operador.
- La interacción del operador con la anunciación debe ajustarse a las demandas de las otras tareas de la sala de control.

4.2 DIRECTRICES

A partir de un conjunto de principios de diseño, las directrices recomiendan acciones. Las directrices son más específicas que los principios y requieren menos experiencia en su interpretación, asimismo, las directrices son más bajas en autoridad y más generales de aplicación (las situaciones a las que la regla puede ser aplicada) que los estándares (Martínez y Cueva, 2001). Por lo que las

directrices permiten asegurar consistencia a través de las diferentes partes de un sistema y de una familia de sistemas. Brown (1988) resume los objetivos de las directrices del siguiente modo: una aproximación sistemática a usar la experiencia práctica, difundir e incorporar experiencia experimental, incorporar reglas de sentido común, promover la consistencia entre los diseñadores de las diferentes partes de la interfaz y aplicar los test de facilidad de uso para tratar de resolver los conflictos que puedan surgir.

En la Unión Europea, se han fijado criterios de carácter general sobre las acciones en materia de seguridad y salud en los centros de trabajo, mediante directivas. La directiva aplicable en España para el uso de PVD está incluida en el Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen las pantallas de visualización (BOE, 1997). El Real Decreto realiza la transposición al derecho español del contenido de la Directiva 90/270/CEE, de 29 de mayo de 1990, que establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyan pantallas de visualización (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1990). Los criterios de referencia para los puestos de trabajo con pantallas están detallados en la Guía Técnica del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 2006), para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos con PVD, y en la serie de normas UNE-EN-ISO 9241 (ISO, 1999).

Las principales guías y directrices sobre factores humanos de Estados Unidos del ámbito militar (DoD o *Department of Defense*) y de la aviación (FAA - *Federal Aviation Administration*) se muestran en la tabla 4-4.

Tabla 4-4. *Directrices en el Ámbito Militar y de Aviación de Estados Unidos*

Referencia	Título y fecha de emisión
DOT/FAA/CT-01/08	<i>Computer-Human Interface Guidelines: A Revision to CHAPTER 8 of the Human Factors Design Guide. 2001.</i>
DOT/FAA/CT-96/1	<i>Human Factors Design Guide. 1996.</i>
MIL-HDBK-46855A	<i>Human Engineering Program Process And Procedures. 1999.</i>
MIL-HDBK-759C	<i>Human Engineering Design Guidelines. 1998.</i>

4.2.1 **Directrices del ámbito nuclear**

A continuación se presenta la aproximación en el dominio nuclear del regulador U.S. NRC, del organismo de investigación EPRI y del Proyecto Halden.

4.2.1.1 **Guías y directrices sobre salas de control y sistemas de alarma de U.S. NRC**

En primer lugar, se presenta en forma de tabla, por orden cronológico, los principales documentos que recogen las guías y las directrices relativas a interfaces de salas de control y de sistemas anunciadores y de alarmas de U.S. NRC (tabla 4-5), que suelen aplicarse en el ámbito de las centrales nucleares de España. En el Apéndice A se incluye una breve descripción del contenido de cada documento.

Tabla 4-5. Guías y Directrices Sobre Salas de Control y Sistemas de Alarma de U.S. NRC

Referencia	Título y fecha de emisión
NUREG/CR-1270	<i>Human Factors Evaluation of Control Room Design and Operator Performance at Three Mile Island. 1980.</i>
NUREG/CR-2147	<i>Nuclear Control Room Annunciators: Problems and Recommendations. 1981.</i>
NUREG/CR-2496	<i>Human-Engineering Design Considerations for Cathode-Ray-Tube-Generated Displays. 1982.</i>
NUREG/CR-2776	<i>Alarms within Advanced Displays Systems: Alternatives and Performance Measures. 1982.</i>
NUREG/CR-3003	<i>Human Engineering Design Considerations for Cathode Ray Tube-Generated Displays. Volume II. 1983.</i>
NUREG/CR-3217	<i>Near-term Improvements for Nuclear Power Plant Control Room Annunciator Systems. 1983.</i>
NUREG/CR-3557	<i>CRT Display Evaluation: the Checklist Evaluation of CRT-Generated Displays. 1983.</i>
NUREG/CR-3684	<i>Nuclear Power Plant Alarm Prioritization (NPPAP). Program Status Report. 1984.</i>
NUREG/CR-3987	<i>Computerised Annunciator Systems. 1985.</i>
NUREG/CR-4227	<i>Human Engineering Guidelines for the Evaluation and Assessment of Video Display Units. 1985.</i>
NUREG/CR-4463	<i>Human Factors in Annunciator/Alarm Systems: Annunciator Experiment Plan I. 1986.</i>
NUREG/CP-0097	<i>Sixteenth Water Reactor Safety Information Meeting. A Value-Impact Assessment of Potential Upgrades to Control Room Annunciators. Vol. 1 (pp.307-328). 1989.</i>
NUREG/CR-5908	<i>Advanced Human-System Interface Design Review Guideline. Vol. 1 y 2. 1994.</i>
NUREG/CR-6105	<i>Human Factors Engineering Guidance for the Review of Advanced Alarm System. 1994.</i>
NUREG/CR-6633	<i>Advanced Information Systems: Technical Basis and Human Factors Review Guidance. 2000.</i>
NUREG/CR-6635	<i>Soft Controls: Technical Basis and Human Factors Review Guidance. 2000.</i>
NUREG/CR-6636	<i>Maintainability of Digital Systems: Technical Basis and Human Factors Review Guidance. 2000.</i>
NUREG/CR-6637	<i>Human-System Interface and Plant Modernization Process: Technical Basis and Human Factors Review Guidance. 2000.</i>
NUREG/CR-6684	<i>Advanced Alarm Systems: Revision of Guidance and its Technical Basis. 2000.</i>
NUREG/CR-6690	<i>The Effects of Interface Management Tasks on Crew Performance and Safety in Complex Computer-based Systems: Overview and Main Findings. Vol 1 y 2. 2002.</i>
NUREG/CR-6691	<i>The Effects of Alarm Display, Processing, and Availability on Crew Performance. 2000.</i>
NUREG/CR-6749	<i>Integrating Digital and Conventional Human-System Interfaces: Lessons Learned from a Control Room Modernization Program. 2002.</i>
NUREG/CR-6947	<i>Human Factors Considerations with Respect to Emerging Technology in Nuclear Power Plants. 2008.</i>

En el Apéndice A se incluye también un resumen de las secciones y los criterios de factores humanos para los sistemas de alarma del NUREG-0700 (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b), estando las guías organizadas en las siguientes secciones:

- Funciones de alto nivel del sistema de alarma: definición de alarma, procesamiento de alarmas, priorización de alarmas y disponibilidad del mensaje.
- Pantalla de información: pantalla general de alarmas, pantalla de alarmas de alta prioridad, pantalla del estado de las alarmas, pantalla de alarmas agrupadas, contenido de las alarmas, métodos de codificación: general, códigos visuales y códigos acústicos, organización de alarmas: pantallas espacialmente dedicadas, continuamente visibles y organización de alarmas: listas de mensajes de alarma.

- Interacción usuario-sistema y controles: general del control de alarmas, función de silenciar, controles de reconocimiento, función de rearme, gestión de la alarma, características automáticas e instrumentos de control.
- Fiabilidad, prueba, mantenimiento y características de indicación de fallo.
- Procedimientos de respuesta a alarmas.
- Distribución e integración de pantallas y controles.
- Integración con otros elementos de la interfaz persona-sistema.

El NUREG-0700, sobre directrices para las revisiones de diseño de la interfaz persona-sistema, es considerado por algunos autores como un documento de carácter prescriptivo, puesto que incluye los términos debería y no debería. No obstante, para autores como Honeywell (2011e) ofrece poca orientación sobre cómo alcanzar los objetivos deseados.

En el proceso de revisión del diseño del sistema de alarma se aplican otras guías adicionales comprendidas en el NUREG-0700, relativas a pantallas o a la interacción usuario-sistema. El procedimiento de verificación consiste en la comparación de las características de la interfaz del sistema de alarma con guías y estándares que contienen los criterios de factores humanos. Al verificar los criterios específicos con el elemento de la interfaz, en el caso de encontrar discrepancias con las guías, resulta necesario describir la desviación en un formato de discrepancias. Al evaluar la desviación, en ocasiones se puede justificar que no resulta necesario su corrección, puesto que las desviaciones pueden resultar aceptables en el contexto del diseño de los sistemas anunciadores integrados, en numerosas ocasiones el sistema de alarma computarizado es implantado como un sistema complementario y de apoyo al sistema convencional anunciador basado en paneles. La verificación se lleva a cabo de modo iterativo, procediendo en sucesivas etapas a realizar la verificación de las características del diseño disponibles, en función del estado de desarrollo e implantación de la funcionalidad en el sistema. Una vez identificadas las desviaciones, hay que proceder a comprobar la implantación de las acciones correctoras propuestas y, por último, al cierre de la desviación para concluir el proceso de verificación.

A modo de ejemplo de la aplicación de las guías de factores humanos sobre sistemas de alarma proporcionadas en NUREG-0700, en el proceso de verificación del sistema de alarma avanzado diseñado para una planta de referencia española de un Reactor de Agua en Ebullición (BWR), se detectaron una serie de discrepancias con las guías de factores humanos, obteniendo un total de 75 formatos de discrepancias (Torralba, Zamora, Silveira y Blanquer, 2001), mientras que una planta tipo PWR se obtuvieron un total de 70 formatos de discrepancias (Torralba, Zamora y García Marful, 2001). La figura 41 muestra la sala de control del reactor PWR de la central nuclear de Almaraz. En aproximadamente un 35% de las desviaciones, se justificó que no era necesario corregirlas, fundamentalmente por el diseño de la planta y la información existente en la sala de control, por la existencia de un sistema de alarma complementario (el sistema convencional de paneles anunciadores) o por la inviabilidad técnica de las herramientas de diseño (Torralba, 2002). La identificación y corrección de la desviación quedó documentada en formatos de discrepancias.



Figura 4-1. Sala de control de C. N. de Almaraz (Foro Nuclear, n.d.).

4.2.1.2 Guías y directrices sobre salas de control y sistemas de alarma de EPRI

En segundo lugar, se incluyen las guías y directrices sobre salas de control y sistemas de alarma de *Electric Power Research Institute* (EPRI) de los Estados Unidos. EPRI, fundado en 1973, realiza investigación y desarrollo sobre generación, distribución y uso de la energía, siendo una organización independiente, sin ánimo de lucro y para el interés público. A mediados de los años 70, EPRI comenzó a estudiar la aplicación de los principios de la ingeniería de los factores humanos en el desarrollo de salas de control de centrales nucleares, mediante la revisión de cinco salas de control, identificando desviaciones de los estándares de factores humanos así como áreas que podrían llevar a errores humanos y a accidentes (EPRI, 1976). En la actualidad, las plantas de energía nuclear en los Estados Unidos están llevando a cabo programas de modernización de I&C con equipos digitales para hacer frente a los problemas de obsolescencia de los equipos y a la necesidad de mejorar el rendimiento de la planta, manteniendo los niveles de seguridad. Como parte del programa de modernización de I&C, la sala de control y otras interfaces persona-sistema también están en proceso de modernización (Naser y Morris, 2004). En 2001, EPRI y el Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos iniciaron un proyecto para desarrollar guías, o directrices, y sus bases técnicas para las salas de control y las interfaces digitales.

La motivación de EPRI para desarrollar sus propias guías o directrices en procesos de modernización de salas de control proviene de los siguientes argumentos (EPRI, 2000): los documentos de U.S. NRC se centran en la seguridad, mientras que las centrales se centran en la seguridad, pero el diseño de la interfaz debe ser también compatible con la eficiencia y la productividad; los procedimientos del NUREG-0711 y NUREG-0700 están orientados a revisiones del diseño, mientras que las centrales necesitan procedimientos para el diseño y la evaluación del diseño; y, los métodos específicos para realizar los análisis no se describen en los documentos reguladores, son a elección del diseñador.

A continuación se muestra cronológicamente, en la tabla 4-6, los principales documentos de EPRI relacionados con guías y directrices de sala de control y de sistema anunciador y de alarma. En el Apéndice A, se describe brevemente el contenido de cada documento.

Tabla 4-6. Guías y Directrices Sobre Salas de Control y Sistemas de Alarma de EPRI

Referencia	Título y fecha de emisión
EPRI NP-309	<i>Human Factors Review of Nuclear Power Plant Control Room Design.</i> 1976.
EPRI NP-613	<i>On-Line Power Plant Alarm and Disturbance Analysis System, Interim Report.</i> 1978.
EPRI NP-1118	<i>Human Factors Methods for Nuclear Control Room Design.</i> 1979.
EPRI NP-1982	<i>Evaluation of Proposed Control Room Improvements Through Analysis of Critical Operator Decisions.</i> 1981.
EPRI NP-2411	<i>Human Engineering Guide for Enhancing Nuclear Control Rooms.</i> 1982.
EPRI NP-3448	<i>A Procedure for Reviewing and Improving Power Plant Alarm Systems.</i> Vol. 1 y 2. 1984. 1990 (rev. 1).
EPRI NP-3659	<i>Human Factors Guide for NPP Control Room Development.</i> 1984.
EPRI NP-3701	<i>Computer-Generated Display System Guidelines.</i> 1984.
EPRI NP-4361	<i>Power Plant Alarm Systems: A Survey and Recommended Approach for Evaluating Improvements.</i> 1985.
EPRI NP-5795	<i>Control-Room Deficiencies, Remedial Options, and Human Factors Research Needs.</i> 1988.
EPRI NP-5693	<i>An Evaluation of Alternative Power Plant Alarm Presentations.</i> 1988.
EPRI TR-100584	<i>Control Room Alarm System Upgrades.</i> 1992.
EPRI TR-100838	<i>Alarm Processing and Diagnostic System.</i> 1992.
EPRI TR-101814	<i>Human Factors Guidelines for Fossil Power Plant Control Rooms and Remote-Control Stations.</i> 1993.
EPRI 1001066	<i>Human Factors Guidance for Digital I&C Systems and Hybrid Control Rooms: Scoping and Planning Study.</i> 2000.
EPRI 1003569	<i>Nuclear Power Plant Control Room Modernization Planning.</i> 2002.
EPRI 1003662	<i>Alarm Processing Methods: Improving Alarm Management in Nuclear Power Plant Control Room.</i> 2003.
EPRI 1007794	<i>Critical Human Factors Technology Needs for Digital Instrumentation and Control and Control Room Modernization.</i> 2003.
EPRI 1003696	<i>Interim Human Factors Guidance for Hybrid Control Rooms and Digital I&C Systems.</i> 2003. Documento reemplazado por EPRI 1008122 (EPRI, 2004a).
EPRI 1002830	<i>Information Display Considerations for Designing Modern Computer-Based Display Systems.</i> 2003.
EPRI 1007795	<i>Technical Material for a Workshop on Control Room Upgrades.</i> 2003.
EPRI 1008122	<i>Human Factors Guidance for Control Room and Digital Human-System Interface Design and Modification. Guidelines for Planning, Specification, Design, Licensing, Implementation, Training, Operation and Maintenance.</i> 2004.
EPRI 1008124	<i>Practical Maintenance of Digital Systems. Guidance to Maximize the Benefits of Digital Technology for the Maintenance of Digital Systems and Plant Equipment.</i> 2004
EPRI 1010076	<i>Advanced Control Room Alarm System: Requirements and Implementation Guidance.</i> 2005.
EPRI 1013483	<i>Alarm Management Requirements Based on Electricite de France Experience. Volume 1 – Essential Features of EdF Nuclear Power Plant Alarm System. Volume 2 – EdF Alarm Management Requirements.</i> 2006.
EPRI 1014316	<i>Alarm Management and Annunciator Applications Guidelines.</i> 2008.
EPRI 1023146	<i>Alarm Management Implementations: Using EPRI's Alarm Management Guidelines to Improve Alarm Management Systems.</i> 2011.

4.2.1.3 Guías y directrices sobre sistemas de alarma del Proyecto Halden

El Proyecto Halden ha diseñado, desarrollado y evaluado, por medio de test y experimentos, sistemas de alarma computarizados desde 1983 (Berg et al., 2011). Ha organizado también reuniones de especialistas para obtener retroalimentación sobre la investigación, el diseño y las pruebas de

sistemas de alarma computarizados y plataformas de desarrollo de sistemas de alarma (Bye, Hol, Kårstad, Meyer y Nilsen, 1992).

Bye, Berg y Øwre (1994) resumen las diversas aproximaciones seguidas por el Proyecto Halden:

- El filtrado y afrontamiento de las alarmas convencionales fueron tratadas con el sistema HALO (*Handling Alarms using LOGic*) (S. Baker, Gertman, et al., 1985; S. Baker, Hollnagel, et al., 1985; Hollnagel y Øwre, 1984; Marshall, 1982; Øwre, Molteberg, Nielsen y Porkholm, 1983; Øwre y Tamayama, 1982; Reiersen, Evjen y Molteberg, 1987; Reiersen, Marshall y Baker, 1987; Reiersen, Marshall, Verle y Gertman, 1987; Visuri y Øwre, 1982).
- Los métodos de alarmas basados en modelos se exploraron en el sistema EFD (*Early Fault Detection*) (Berg, Grini, Johansen y Lilja, 1990; Bye y Sørenssen, 1991; Ness y Berg, 1990; Sørenssen, 1990).
- La aproximación orientada a funciones se exploró mediante CFMS (*Critical Function Monitoring System*) (Hollangel, Hunt y Marshall, 1983), SPMS (*Success Path Monitoring System*) (S. Baker, Marshall, Reiersen, Smith, y Gaudio, 1988) y un sistema de ayuda post-disparo denominado SAS-II (Holmström, Jacobsson y Henriksson, 1993; Øwre et al., 1990; Øwre, Nilsen, y Meyer, 1991).

Berg et al. (2011) describen otros sistemas desarrollados posteriormente para el laboratorio HAMMLAB:

- La herramienta genérica para configurar sistemas de alarma denominada COAST (*COMputerised Alarm System Toolbox*) (Bye, Farbrot, Lee y Louapre, 1998; Bye, Farbrot, Nystad y Jakobsen, 1999; Bye, Handelsby, Storberget y Nilsen, 1994).
- El sistema de alarma CASH (*Computerized Alarm System for HAMMLAB*) (Bye, Hol, et al., 1992; Førdestrømmen et al., 1994; Miazza, Torralba, Kårstad, Moum y Follesø, 1993; Moum, Decurnex, Førdestrømmen, Karlsen y Olsen, 1996; Moum et al., 1998).
- El sistema de alarma HAMBO, con una aproximación basada en el estado (*HAMMLAB Boiling Water Reactor Alarm System*) (Kaarstad, 2004; Kaarstad y Nihlwing, 2011; Kaarstad y Seim, 2004; Karlsson, Meyer, Jokstad, Farbrot y Hulsund, 2002; Nihlwing y Kaarstad, 2012, 2013).

En las instalaciones del Proyecto Halden también se ha llevado a cabo investigación experimental sobre sistemas de alarma en el laboratorio HAMMLAB para la NRC estadounidense (O'Hara, Brown, Hallbert, Skraaning, Persensky y Wachtel, 2000), cuyos resultados fueron empleados por el regulador para el desarrollo de directrices sobre sistemas de alarma (Brown et al., 2000).

El Proyecto Halden ha elaborado guías, directrices y recomendaciones basadas en las lecciones aprendidas de sus desarrollos en el ámbito de los sistemas de alarma (Moum et al., 1998; Sørenssen et al., 2002; Veland et al., 2001). Específicamente, en “Sistemas de alarmas útiles y utilizables: propiedades recomendadas” (Veland et al., 2001), el Proyecto Halden identifica y formula un conjunto de propiedades importantes para los sistemas de alarma, basándose en la revisión de guías y estándares internacionales y en su experiencia en la especificación y el diseño de sistemas de alarma, empleados en actividades experimentales en HAMMLAB y en proyectos bilaterales. Incluye cuarenta y tres recomendaciones, divididas en recomendaciones generales y recomendaciones más detalladas sobre generación, estructuración y presentación de alarmas. Cada recomendación describe la

funcionalidad considerada esencial (*shall*) o muy valiosa (*should*) en un sistema de alarma de alta calidad. Además, cada recomendación presenta un objetivo y comentarios adicionales. El documento constituye una aportación relevante a las guías de diseño de sistemas persona-máquina, ya que proporciona lecciones aprendidas basadas en experimentación y en trabajo de campo realizado sobre sistemas de alarma en salas de control de procesos complejos. En el Apéndice A, se incluye una tabla resumen de las propiedades recomendadas para los sistemas de alarma por Veland et al. (2001).

4.2.2 Directrices de salas de control y sistemas de alarma en la industria de procesos

En el ámbito de la industria de procesos, se han elaborado una serie de normas y directrices de diversos orígenes, en ocasiones paralelas entre sí, que, en función de los antecedentes de los editores y del tipo de industria, se centran en aspectos diferenciados. Constituyen la base para los desarrollos técnicos en el campo de la gestión de alarmas. Los sistemas de control actuales y las posibilidades técnicas permiten, a los operadores de sistemas de procesos, mejorar la calidad de los sistemas de alarma y por consiguiente, no sólo observar los requisitos legales, también obtener beneficios con respecto a la seguridad y la rentabilidad de su aplicación (Siemens, 2008).

En la industria química, la gestión de alarmas resulta cada vez más importante, puesto que las plantas persiguen reducir los costes, aumentar la productividad y afrontar la pérdida de operadores experimentados. Además, la inclusión de modernos sistemas de control distribuido (DCS) da lugar al cambio de diseño de salas de control construidas en paneles a alarmas basadas en *software* (Goble y Stauffer, 2007; Queirolo, 2011; Stauffer, 2012), eliminando las restricciones de espacio físico para añadir nuevas alarmas, pero siendo la pérdida de la visión global el problema comúnmente planteado por los operadores (Nimmo, 2006; Shaw, 1993; Stauffer, Sands y Dunn, 2010a).

Entre las directrices sobre sistemas de alarma y gestión de alarmas muy relevantes de la industria de procesos de sistemas complejos destaca la emitida por la asociación de usuarios de materiales y de equipos de ingeniería (*Engineered Equipment and Materials Users Association* o EEMUA), que habitualmente se usa como referente en la industria nuclear, por lo que se describe a continuación. En el Apéndice B se incluye un apartado que recoge otras directrices de la industria, agrupadas por instituciones.

4.2.2.1 Engineered Equipment and Materials Users Association (EEMUA)

La asociación de usuarios de materiales y de equipos de ingeniería (EEMUA), es una asociación europea de la industria, sin ánimo de lucro, para el beneficio de empresas de propietarios u operadores de las instalaciones industriales. La misión de EEMUA, con sede en Reino Unido, es mejorar la calidad y la seguridad, reducir el coste de operación de las instalaciones industriales, intercambiando experiencias y conocimientos, y por la promoción activa de los distintos intereses de los usuarios de la ingeniería (<http://www.eemua.co.uk/>).

Destacan dos documentos de EEMUA, uno sobre sistema de alarma, EEMUA 191 (EEMUA, 1999, 2007, 2013), otro sobre diseño de la interfaz, EEMUA 201 (EEMUA, 2002, 2010).

En primer lugar, el documento EEMUA 191 (EEMUA, 1999) fue copatrocinado por compañías pertenecientes a EEMUA y por el Consorcio ASM de la industria química, se convirtió en el primer documento que abordaba el papel de la gestión de alarmas en la industria de procesos. El ámbito de aplicación de la guía está destinado a sistemas de alarma en varios procesos industriales

como industrias de productos químicos, generación de energía, o extracción y refinado de petróleo y de gas. El objetivo es ayudar al personal implicado en el diseño, la adquisición, la operación, el mantenimiento y la gestión de sistemas de alarma, para desarrollar sistemas que sean más útiles y que resulten en una operación más segura y más rentable.

EEMUA 191 es un conjunto de directrices para la gestión de alarmas, basadas en la experiencia de los usuarios finales y en estudios de factores humanos, describe buenas prácticas y recomendaciones aplicadas a la gestión de alarmas. Ofrece directrices sobre la filosofía del sistema de alarma, el papel del operador, los principios de diseño, las prioridades de las alarmas, aspectos de implementación, las medidas de actuación, la gestión de un programa de mejora y la especificación y la adquisición de nuevos sistemas de alarma. La mayoría de las directrices generales son aplicables a sistemas computarizados y en paneles anunciadores.

EEMUA 191 no fue concebido como un estándar, sino como una guía de usuario, no obstante, está reconocida como buenas prácticas y se ha convertido en un estándar de facto para el diseño, la gestión y la adquisición de sistema de alarma. En Reino Unido, HSE recomienda que se utilice la guía EEMUA 191 (Wilkinson, 2007). Diversas directrices y normas, como NAMUR NA102 (NAMUR, 2003) e ISA RP18.2 (ISA, 2009) de gestión de sistemas de alarma para industrias de procesos, descritas en el Apéndice B, se basan en los conceptos de EEMUA 191.

En segundo lugar, el documento EEMUA 201 (EEMUA, 2002, 2010) proporciona los factores a contemplar, por los operadores de procesos industriales, en el diseño de sistemas de interfaz persona-ordenador. Incluye, entre otros, el diseño de la sala de control y el diseño de pantallas de presentación.

4.2.3 Directrices de sistemas de alarma: reuniones de especialistas en alarmas

Entre un gran número de conferencias, seminarios, talleres, reuniones de grupos de expertos en sistemas de alarma, a continuación se destaca los resultados de un grupo de especialistas de la OIEA (IAEA, 1996a), un taller de la OCDE sobre factores humanos (Fahlbruch, Dubiel, Neumann y Kaupach, 2007; OECD, *Environment Directorate*, 2008) y los seminarios de formación de IBC sobre sistemas de alarma (IBC, 1999, 2000).

En primer lugar, la reunión de especialistas “*Experience and improvements in advanced alarm annunciation systems in nuclear power plants*” fue convocada en el marco del programa del grupo internacional de I&C de centrales nucleares del OIEA (IAEA, 1996a). Contó con sesenta y dos participantes de nueve países, con un total de veintidós ponencias. Los participantes procedían de centrales nucleares, de ingenierías, de centros de investigación y desarrollo y de organismos reguladores. Estuvo estructurada en siete sesiones: necesidades y experiencias de los usuarios; perspectiva reguladora; nuevas implementaciones; estructuración de alarmas y herramientas de diseño; cuestiones importantes a considerar; integración de la anunciación y el diagnóstico; discusión general, conclusiones y recomendaciones.

Algunas de las presentaciones incluyeron recomendaciones sobre el diseño de los sistemas de alarma. En este sentido, Long y Davey (1996) proporcionaron directrices genéricas sobre las necesidades de información de los operadores con relación a los sistemas de alarma así como directrices orientadas al sistema anunciador de la central nuclear Darlington de Ontario (Canadá). El desarrollo de directrices sobre sistemas de alarma, resultado de un proyecto patrocinado por la NRC, se puede consultar en O’Hara (1996). Beattie et al. (1996) revisaron los sistemas anunciadores de las

salas de control de las centrales nucleares de Canadá, así como las principales directrices internacionales sobre sistemas anunciadores, en un proyecto financiado por el organismo regulador nuclear AECB, en la actualidad Comisión de Seguridad Nuclear de Canadá (CNSC).

En segundo lugar, el objetivo general del taller de la OCDE sobre “Factores humanos en accidentes químicos” fue explorar los factores humanos relacionados con la gestión y la operación de una instalación de alto riesgo, y compartir información sobre las herramientas de evaluación para el análisis y la reducción del error humano, de empresas pequeñas y medianas, en la industria química (Fahlbruch et al., 2007; OECD, Environment Directorate, 2008).

La sesión temática 5, dedicada a factores humanos en la gestión de alarmas, tenía por objeto la forma de considerar los factores humanos en el diseño de nuevos sistemas de alarma y en la evaluación y la mejora de los sistemas existentes. Se revisaron las regulaciones y los estándares técnicos de HSE sobre el tratamiento de alarmas (HSE, 2000, 2004), la gestión de alarmas de NAMUR NA 102 (NAMUR, 2005) y EEMUA 191 (EEMUA, 1999). Se proporcionaron una serie de recomendaciones sobre los sistemas de alarma, obtenidas a partir de estos documentos, objeto de análisis durante la reunión (Fahlbruch et al., 2007). Posteriormente, en el informe del taller se incluyeron una serie de conclusiones, observaciones y recomendaciones sobre los sistemas de alarma (OECD, Environment Directorate, 2008). Consideraron que las mejores prácticas en la gestión de alarmas se recogen en EEMUA (1999), recomendaron que cada planta de elevado riesgo debe tener: una estrategia clara de gestión de alarmas, una guía de diseño de alarmas, una lista de indicadores clave de rendimiento, un responsable de la gestión de alarmas y un programa de auditorías.

En tercer lugar, IBC fue una de las primeras compañías organizadoras de conferencias y cursos monográficos sobre sistemas de alarma, en Londres (IBC, 1999). La primera conferencia de IBC sobre sistemas de alarma celebrada en 1999 estuvo organizada en cuatro sesiones: el establecimiento de la filosofía de alarmas, la presentación de alarmas, el diagnóstico y la respuesta a fallos y el desarrollo de sistemas de alarma en colaboración con suministradores. Se presentaron un total de quince ponencias, que cubrían el área del control de procesos de plantas industriales, como químicas, nucleares o gas. Diversas ponencias revisaron los estándares y proporcionaron directrices para los sistemas de alarma (IBC, 1999). La segunda conferencia de IBC sobre sistemas de alarma constó de once ponencias, que cubrían los avances realizados hacia la gestión de las alarmas, la forma de diseñar los sistemas de alarma, la teoría y la práctica de sistemas de alarma, definir y aplicar la mejor práctica, el análisis y el diagnóstico de alarmas, las alarmas del proceso, las directrices para sistemas relacionados con la seguridad, el afrontamiento (tratamiento) de las alarmas, factores humanos y sistemas de alarma, diseñadores y modelos de usuario, los accidentes mayores y el rol del sistema de alarma (IBC, 2000). IBC Energy continúa realizando regularmente conferencias y seminarios sobre sistemas de alarma, el último ‘*Alarm management and HMI conference*’ en junio de 2015, en Londres.

4.3 ESTÁNDARES

Un estándar es un requisito, regla o recomendación basada en principios probados y en la práctica (Smith, 1996 citado en Martínez y Cueva, 2001). Se establece una distinción entre recomendación o guía (práctica recomendada) y regulación (requisito mandatorio u obligatorio o preceptivo). Hay estándares basados en requisitos y estándares basados en recomendaciones. Los estándares basados en requisitos indican lo que debería realizarse, emplean el término *deberá (shall)*,

mientras que los estándares basados en recomendaciones proporcionan guías aconsejando qué realizar, en forma de recomendaciones, con el término debería (*should*) (Harker, 1995; Stewart, 2000), esto es, los estándares basados en recomendaciones tienden a ofrecer un consejo más general para la elección más adecuada entre varias alternativas (Harker, 1995).

Los estándares pueden ser locales –diseño o práctica aceptada por una industria, organización profesional o entidad empresarial–, nacionales –convención aceptada por una amplia variedad de organizaciones dentro de una nación–, e internacionales –consenso entre organizaciones de estándares a nivel mundial– (Martínez y Cueva, 2001). Hay dos tipos de estándares, de iure y de facto. Los estándares de iure son generados por un comité con estatus legal y están avalados por un gobierno o institución para producir estándares. Los estándares de facto nacen de productos de la industria con éxito en el mercado o de desarrollos de grupos de investigación, llegan a tener un uso muy generalizado, convirtiéndose en estándares de facto.

La producción de estándares es un proceso complejo, se confecciona un documento preliminar que se hace público, cualquier persona o empresa puede presentar enmiendas al documento, que son comentadas y resueltas, hasta alcanzar un consenso para aceptar el nuevo estándar.

4.3.1 Principales organismos dedicados a la estandarización

Entre las principales organizaciones que se dedican a la estandarización, a nivel internacional y nacional, destacan las siguientes:

- Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC – *International Electrotechnical Commission*), fundada en 1906, compuesta por comités en más de 40 países. IEC es la organización que prepara y publica normas internacionales sobre electricidad, electrónica y tecnologías relacionadas. IEC coopera estrechamente con la Organización Internacional de Normalización (ISO), mediante un Comité Técnico de Conexión (<http://www.iec.ch/>).
- Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos Americano (IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), es una asociación profesional técnica para estándares con socios de más de 150 países (<http://www.ieee.org/index.html>).
- Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI – *American National Standards Institute*), ha sido el administrador y coordinador del sistema voluntario de normalización del sector privado de la industria de Estados Unidos. Fundado en 1918, es una organización privada, no lucrativa, con asociados en calidad de miembros, que cuenta con el apoyo de diversas organizaciones del sector público y privado. ANSI es miembro de ISO y de IEC (<http://www.ansi.org/>).
- Sociedad de Instrumentistas de América (ISA). Fue creada en 1945, como la Sociedad de Instrumentistas de América (*The Instrument Society of America*) y, a finales de 2000, pasó a denominarse la Sociedad para la Instrumentación, Sistemas y Automatización (*The Instrumentation, Systems, and Automation Society*). ISA es una organización global sin fines de lucro, con sede en Estados Unidos, que establece los estándares en automatización (<http://www.isa.org/>).
- Organización Internacional de Normalización (ISO – *International Organization for Standardization*), fundada en 1947, con sede en Ginebra, es una federación mundial de cuerpos de estándares nacionales de más de 130 países. Los trabajos de ISO son publicados como normas internacionales (<http://www.iso.ch>).

- Comité Europeo de Normalización (CEN), es el principal proveedor de estándares europeos y de especificaciones técnicas. Tiene como misión promover la armonización técnica, de forma voluntaria, en Europa. Es la única organización europea reconocida oficialmente para adoptar estándares europeos en todas las áreas de la actividad económica, con la excepción de la electrotecnia (responsabilidad de CENELEC – Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica, <http://www.server.cenelec.be>, reconocido en la Directiva 83/189/CEE) y las telecomunicaciones (ETSI – Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones, <http://www.etsi.org>) (<http://www.cenorm.be>).
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) es la entidad privada dedicada al desarrollo de las actividades de normalización y certificación en España. Su objetivo es contribuir a mejorar la calidad y la competitividad de las empresas, los productos y servicios, así como proteger el medioambiente y el bienestar de la sociedad. España participa en ISO por medio de AENOR (<http://www.aenor.es>).

4.3.2 Características de los estándares: beneficios e inconvenientes

Los estándares ergonómicos juegan un rol muy importante en la facilidad de uso de los sistemas, para la consistencia y la calidad de los componentes de la interfaz de usuario. Proporcionan a los gestores confianza en los sistemas a adquirir, para usarlos de modo productivo, eficiente, seguro y confortable (Stewart, 1995). El desarrollo de estándares para la ergonomía del *software* tiene la potencialidad de aumentar sustancialmente la aplicación de las buenas prácticas en ergonomía en todos los estados del proceso de desarrollo del *software*, desde la concepción al uso (Harker, 1995).

Los estándares conllevan una serie de beneficios (Martínez y Cueva, 2001), como son:

- Terminología común: los diseñadores comparten los mismos conceptos, permitiendo hacer valoraciones comparativas.
- Mantenimiento y evolución: todos los programas tienen la misma estructura y el mismo estilo.
- Identidad común: todos los sistemas son fáciles de reconocer.
- Formación: los conocimientos son más fáciles de transmitir de un sistema a otro.
- Salud y seguridad: los sistemas que han pasado controles de estandarización sufrirán menos comportamientos inesperados.

Entre los beneficios de los estándares está facilitar el conocimiento ergonómico a profesionales no especialistas en la materia (Harker, 1995). Y, aunque las directrices pueden proporcionar fuentes más útiles de ayuda, los estándares ofrecen una síntesis de las directrices, proporcionan conjuntos de requisitos y recomendaciones acordados internacionalmente, sujetos a una revisión rigurosa, además, pueden ser fácilmente accesible a través de las publicaciones de los organismos de normalización (Harker, 1995).

Entre las dificultades de los estándares, Stewart (2000) presenta aspectos relacionados con el desarrollo de estándares de la interfaz de usuario: no solucionan todos los problemas del diseño de la interfaz y no consideran los aspectos más difíciles del diseño. Los estándares habitualmente definen o especifican principios generales de diseño y buenas prácticas, no así los detalles precisos de la interfaz (Bevan, 2001). En el desarrollo de estándares, la financiación para la participación de los expertos en los comités es escasa (Parsons, Shackel y Metz, 1995). El proceso de desarrollo de estándares requiere la participación de especialistas técnicos y de aquellos que serán responsables de implementar los

estándares (Harker, 1995). Habitualmente, los miembros de los comités permanecen un período de tiempo relativamente corto, siendo reemplazados por otros expertos (Stewart, 2000). Y la tecnología se desarrolla más rápidamente que los propios estándares (Stewart, 1995).

Una revisión de siete estándares y guías de diseño de lugares de trabajo con PVD, realizada por Helander y Rupp (1984), encontró desacuerdos en la especificación de los parámetros de diseño de estándares y de guías. La explicación podría encontrarse en los diferentes objetivos de los estándares (productividad frente a confort), la falta de una investigación básica adecuada y las aplicaciones o tareas a desempeñar con PVD.

4.3.3 Orígenes de los estándares en el ámbito de los factores humanos

La ergonomía del diseño de las estaciones de trabajo comenzó en Estados Unidos y en Gran Bretaña en 1949, estando centrada en las consolas de operación de radares y en el uso del circuito cerrado de televisión para la transmisión de información alfanumérica (Helander y Rupp, 1984). La estandarización del diseño de las PVD se inició en Alemania en 1972 y, simultáneamente, se llevaron a cabo investigaciones en Austria, Inglaterra, Finlandia, Francia, Holanda, Suecia, Suiza y Estados Unidos (Helander y Rupp, 1984).

El Departamento de Defensa (DoD) de Estados Unidos fue la primera organización que requirió la consideración de la ergonomía en el diseño de equipos y sistemas, financiando investigación básica en el área (Helander y Rupp, 1984). Desarrolló un programa de estandarización de factores humanos, con el objeto de informar la toma de decisiones sobre especificaciones, estándares y manuales de factores humanos en el área militar (Chaikin, 1984). MIL-STD-1472 (1981)²⁴, “*Human engineering design criteria for military systems, equipment, and facilities*”, es el primer estándar ergonómico, en el ámbito militar, enfatiza los aspectos de ejecución, fiabilidad y seguridad (Helander y Rupp, 1984) y cubre criterios de diseño de ingeniería humana, siendo así mismo aplicable a entornos no militares (Chaikin, 1984).

La Asociación Internacional de Ergonomía (IEA – *International Ergonomics Association*) celebró un simposio en 1973, en el Reino Unido, para revisar la situación de la ergonomía en la estandarización, contando con la participación de treinta y tres delegados de once países. Como resultado, acordaron con la Organización Internacional de Normalización (ISO) un comité de ergonomía (Parsons, Shackel y Metz, 1995), estableciendo en 1974 el comité técnico 159 sobre ergonomía (ISO TC 159) para la estandarización de la terminología, la metodología y los datos de factores humanos. El estándar sobre principios relacionados con el diseño de sistemas de trabajo, ISO 6385 de 1981, fue el primero desarrollado y publicado (Nachreiner, 1995).

Por otra parte, existían otros organismos que elaboraron estándares en el campo de la ergonomía (Parsons, 1995). Por ejemplo, Munipow (1984) describe el programa de cooperación en el desarrollo de estándares ergonómicos entre los países del Este de Europa miembros de *Council for Mutual Economic Aid* (CMEA). Desde 1980, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos Americano (IEEE) ha apoyado el desarrollo de estándares de factores humanos, en el marco del subcomité 7 (Voss, 1997). Los estándares europeos se llevan a cabo en el Comité Europeo de Normalización (CEN), que sustituyen a los estándares nacionales en la Comisión Europea y en los estados miembros de la Asociación Europea de Libre Comercio, EFTA (Stewart, 1995). CEN/TC 122

²⁴ MIL-STD-1472G (2012) está vigente en la actualidad.

de Ergonomía, sobre requisitos ergonómicos de seguridad de las máquinas, se estableció en 1989 (Dul, Vries, Verschoof, Eveleens y Feilzer, 2004).

Con el objetivo de lograr una armonización en la producción de estándares, ISO y CEN firmaron en 1991 el Acuerdo de Viena, por el que se informan mutuamente de sus actividades y establecen mecanismos de cooperación para la elaboración de las normas internacionales.

4.3.4 Principales estándares de factores humanos y salas de control

Los estándares de iure relacionados con la ingeniería de los factores humanos y el diseño de sistemas interactivos de ANSI, DoD, FAA, IEC, IEEE, ISO, ISA y NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio), se muestran, por orden alfabético de la institución, en la tabla 4-7.

En la tabla 4-7 destacan cuatro estándares específicos de sistemas de alarma: en el ámbito nuclear IEC 62241 (IEC, 2004) y en la industria de proceso: ISA-18.1 (2004), ISA-18.2 (ANSI/ISA-18.2) (2009), IEC 62682 (2014) así como la práctica recomendada ISA RP77.60.02.

Un listado más extenso de los principales estándares sobre criterios de diseño de ingeniería de factores humanos está recogido en *Department of Defense* (2002, 2004). Dul et al. (2004) presentan varias tablas con los estándares ergonómicos de ISO (TC 159) y CEN (TC 122), para diferentes fases del proceso de diseño. Asimismo, la Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas – denominada OGP– identifica los estándares y comités sobre instrumentos y automatización habitualmente empleados por la industria del petróleo y el gas, estando también incluidos aquellos referidos a los sistemas de alarma (*International Association of Oil and Gas Producers*, 2010). Kitamura, Fujita y Yoshikawa (2005) revisan los estándares internacionales relacionados con el diseño de salas de control de centrales nucleares, destacando el estándar IEC 62241 (IEC, 2004) para los sistemas de alarma.

4.3.4.1 Estándares de sistemas de alarma en centrales nucleares

El principal estándar internacional de sistemas de alarma en centrales nucleares es IEC 62241 (IEC, 2004), no obstante, existen también otros estándares desarrollados o adaptados.

El estándar IEC 62241 (IEC, 2004) establece las bases funcionales de diseño de los sistemas de alarma en las salas de control de centrales nucleares, cubriendo los requisitos funcionales, los requisitos y las guías de diseño de factores humanos para las funciones de las alarmas y para la presentación de las alarmas (Kitamura, Fujita y Yoshikawa, 2005). Las definiciones y los requisitos proporcionados en el estándar están recogidos en las secciones de definición y funciones del sistema de alarma.

Tabla 4-7. Principales Estándares para el Diseño y la Evaluación de Sistemas

	Referencia	Título del documento y fecha de emisión
American National Standards Institute (ANSI)	ANSI/HFS 100-1988	<i>American National Standard for Human Factors Engineering of Visual Display Terminal Workstations. 1988.</i>
Department of Defense (DoD)	MIL-STD-1472G	<i>Human Engineering. 2012.</i>
Federal Aviation Administration (FAA)	HF-STD-001	<i>The Human Factors Design Standard. 2003.</i>
International Electrotechnical Commission (IEC)	IEC 447	<i>Man-Machine Interface – Actuating Principles. 1993.</i>
	IEC 964	<i>Design for Control Rooms of Nuclear Power Plants. 1989.</i>
	IEC 60964	<i>Nuclear Power Plants – Control Rooms – Design. 2009.</i>
	IEC 61771	<i>Nuclear Power Plants – Main Control Room – Verification and Validation of Design. 1995.</i>
	IEC 61772	<i>Nuclear Power Plants – Main Control Room – Application of Visual Display Units (VDU). 1995, 2009.</i>
	IEC 62241	<i>Nuclear Power Plants – Main Control Room – Alarm Functions and Presentation. 2004.</i>
	IEC 62682	<i>Management of Alarm System for the Process Industries. 2014</i>
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	IEEE Std 845-1988 (R2011)	<i>IEEE Guide for the Evaluation of Human-System Performance in Nuclear Power Generating Stations. 1988, 1999, 2011.</i>
	IEEE Std 1012-1998 (R2012)	<i>IEEE Standard for Software Verification and Validation. 1998, 2004, 2012.</i>
	IEEE Std 1023-1988 (R2010)	<i>IEEE Recommended Practice for the Application of Human Factors Engineering to Systems, Equipment, and Facilities of Nuclear Power Generating Stations and Other Nuclear Facilities. 1988, 2004, 2010.</i>
	IEEE Std 1082-1997 (R2010)	<i>IEEE Guide for Incorporating Human Action Reliability Analysis for Nuclear Power Generating Stations. 1997, 2010.</i>
	IEEE Std 1289-1998 (R2004)	<i>IEEE Guide for the Application of Human Factors Engineering in the Design of Computer-Based Monitoring and Control Displays for Nuclear Power Generating Stations. 1998, 2004.</i>
	IEEE Std 1786-2011	<i>IEEE Guide for Human Factors Applications of Computerized Operating Procedure Systems (COPS) at Nuclear Power Generating Stations and Other Nuclear Facilities. 2011.</i>
	IEEE Std 7-4.3.2-2003	<i>IEEE Standard Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations. 2003, 2010.</i>

	Referencia	Título del documento y fecha de emisión
	(R2010)	
Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA)	ISA-18.1-1979 (R2004)	<i>Annunciator Sequences and Specifications. 2004.</i>
	ISA RP77.60.02-2000 (R2010)	<i>Fossil Fuel Power Plant Human-Machine Interface: Alarms. 2010.</i>
	ISA-18.2 (ANSI/ISA-18.2)	<i>Management of Alarm Systems for the Process Industries. 2009.</i>
		<ul style="list-style-type: none"> – <i>ISA TR18.2.4:2012. Enhanced and Advanced Alarm Methods. 2012.</i> – <i>ISA TR18.2.5:2012. Alarm System Monitoring, Assessment, and Auditing. 2012.</i> – <i>ISA TR18.2.6:2012. Alarm Systems for Batch and Discrete Processes. 2012.</i>
International Organization for Standardization (ISO)	ISO 6385	<i>Ergonomic Principles in the Design of Work Systems. 1981, 2004.</i>
	ISO/IEC 9126	<i>Software Engineering – Product Quality. 1992, 2003.</i>
	ISO 9241	<i>Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs) Part 1 to 16. 1997-1999.</i> <i>Ergonomics of Human-System Interaction. Part 1 Introduction. Part 2 Job Design. Part 11 Hardware and Software Usability. Part 20 Accessibility and Human-System Interaction. 100 Series Software Ergonomics. 200 Series Human System Interaction Processes (Part 210: Human-Centred Design for Interactive Systems, 2010). 300 Series Displays and Display Related Hardware. 400 Series Physical Input Devices - Ergonomics Principles. 500 Series Workplace Ergonomics. 600 Series Environment Ergonomics. 700 Series Application Domains - Control Rooms. 900 Series Tactile and Haptic Interactions. 2006-2012.</i>
	ISO 9355	<i>Ergonomic Requirements for the Design of Displays and Control Actuators. Part 1: Human Interactions with Displays and Control Actuators (1999). Part 2: Displays (1999). Part 3: Control Actuators (2006).</i>
	ISO 11064	<i>Ergonomic Design of Control Centres. Part 1: Principles for the Design of Control Centres (2000). Part 2: Principles for the Arrangement of Control Suites (2000). Part 3: Control Room Layout (1999, 2002). Part 4: Layout and Dimensions of Workstations (2004). Part 5: Displays and Controls (2008). Part 6: Environmental Requirements for Control Centres (2005). Part 7: Principles for the Evaluation of Control Centres (2006).</i>
	ISO/TR 18529	<i>Ergonomics of Human-System Interaction – Human-Centred Lifecycle Process Descriptions. 2000.</i>
	ISO/TR 16982	<i>Ergonomics of Human-System Interaction – Usability Methods Supporting Human-Centred Design. 2002.</i>
	ISO/TS 18152	<i>Ergonomics of Human-System Interaction – Specification for the Process Assessment of Human-System Issues. 2010.</i>
	ISO 14915	<i>Software Ergonomics for Multimedia User Interfaces. Part 1: Design Principles and Framework (2002). Part 2: Multimedia Navigation and Control (2003). Part 3: Media Selection and Combination (2002).</i>
	ISO/IEC 25000	<i>Software Engineering – Software Product Quality Requirements and Evaluation – Guide to SQuaRE. 2005.</i>
	NASA-STD-3000	<i>Man-Systems Integration Standards. 1995.</i>
NASA (National Aeronautics & Space Adm)		

El estándar IEC 62241 (IEC, 2004) sobre sistema de alarma en centrales nucleares aplica tanto a plantas existentes, siendo empleado, por ejemplo, en procesos de modernización de la sala de control, como a nuevos diseños operativos. Establece los requisitos funcionales para los sistemas de alarma de la sala de control principal de las centrales nucleares. Especifica las funciones de alarma, para la selección y definición de las señales de alarma, el procesamiento de las señales de alarma, la presentación de alarmas, la secuencia de tratamiento de las alarmas, el registro de las alarmas, así como los procedimientos de respuesta a las alarmas. Asimismo, establece los requisitos desde los factores humanos y las directrices de diseño para la presentación de alarmas en la sala de control. Incluye también los términos utilizados para las funciones de las alarmas.

En cuanto a otros estándares del ámbito nuclear, diversas instituciones internacionales han desarrollado o adaptado estándares relativos a sistemas de alarma. Kirwan, Reed y Litherland (1990) describen el desarrollo de un estándar, basado en aspectos ergonómicos clave, para el diseño de plantas de *British Nuclear Fuel* (BNFL), estando una de las seis secciones de las que consta dedicada al sistema de alarma. Comprende directrices preceptivas y recomendadas.

En un estudio del sistema anunciador del reactor avanzado *CANada Deuterium Uranium* (CANDU), denominado *CANDU Annunciation Message List System* (CAMLS), los requisitos del estándar IEC 62241 y de la guía reguladora NUREG-0700 (sección 4 sobre sistemas de alarma) fueron comparados con los conceptos del sistema de alarma CAMLS, encontrándose ligeras diferencias con IEC 62241 (IEC, 2004) relacionadas con las definiciones, las propiedades de las pantallas de las nuevas alarmas y la organización de las pantallas de alarmas en PVD, mientras que con NUREG-0700 eran, entre otras, relativas a las alarmas de estado, las pantallas de alarmas espacialmente dedicadas, las señales audibles para el estado de las alarmas o el silenciamiento de forma manual (Leger et al., 2006).

4.3.4.2 Estándares de sistemas de alarma en la industria de proceso

En la industria de procesos cabe destacar los estándares de ISA y de OSHA.

4.3.4.2.1 *The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA)*

En 1955, la Sociedad de Instrumentistas de América (ISA), creó el comité de alarmas y enclavamientos, que posteriormente dio lugar al Comité 18 de estándares y prácticas. En 1965, se emitió ISA RP18.1 “Especificaciones y guías para el uso de anunciadores de propósito general”.

Entre las recomendaciones y las normas relacionadas con la gestión de alarmas en industrias de procesos destacan ISA-18.1-1979 (R2004) (ISA, 2004), ISA RP77.60.02-2000 (R2010) (ISA, 2010) y ANSI/ISA-18.2-2009 (ISA, 2009). Actualmente está en desarrollo el estándar ISA SP101 “Interfaces persona-máquina”.

En primer lugar, el estándar ISA-18.1-1979 (R2004) “Secuencias y especificaciones de anunciadores” (ISA, 2004) aborda los anunciadores eléctricos que indican la existencia de condiciones anómalas en el proceso, pudiendo variar desde un único armario anunciador, a sistemas anunciadores complejos con muchos armarios de lámparas y armarios lógicos remotos. El objetivo es establecer una terminología uniforme del anunciador, las designaciones de secuencias del anunciador y la presentación de las secuencias, así como facilitar la preparación de las especificaciones y la documentación del anunciador. El estándar está siendo revisado en la actualidad.

En segundo lugar, la práctica recomendada ISA RP77.60.02-2000 (R2010) “Interfaz persona-máquina de plantas de energía de combustibles fósiles: alarmas en panel *hardwired*” (ISA, 2010) proporciona directrices para el desarrollo y el diseño de sistemas de alarma para las plantas de energía fósil, de posible aplicación a otras industrias de procesos. Está dirigida principalmente a los ingenieros de diseño, pero, en última instancia, puede servir a los operadores de las plantas. Las mejores prácticas han sido diseñadas para reducir las discrepancias de las alarmas, racionalizar las alarmas o eliminar los niveles excesivos de ruido. Incluye, además, la agrupación de alarmas, la forma de priorizar, los códigos de colores, las pantallas y otros elementos.

En tercer lugar, se describe, con mayor detalle, el estándar ANSI/ISA-18.2-2009 “Gestión de sistemas de alarma para las industrias de procesos” (ISA, 2009). En 2003, ISA comenzó a desarrollar un estándar de gestión de alarmas, con participantes procedentes de una variedad de segmentos de la industria, incluyendo proveedores, consultores y usuarios finales (Dunn y Sands, 2005; Hollifield, 2010; Stauffer, 2012). El estándar está fundamentado en EEMUA 191 (Stauffer, 2012), en NAMUR NA 102 y en el Consorcio ASM (Siemens, 2010). En cierto modo, EEMUA 191 e ISA-18.2 se complementan, Honeywell (2011g) argumenta que EEMUA describe en detalle las herramientas y las técnicas para los diversos aspectos de la gestión de alarmas (por ejemplo, la racionalización, la evaluación de riesgos o el diseño de gráficos), mientras que ISA-18.2 define claramente los indicadores clave de rendimiento y el enfoque del ciclo de vida para la gestión de alarmas.

El ámbito de aplicación de ISA-18.2 comprende instalaciones en donde los operadores tienen que responder a las alarmas en industrias de proceso (química, petroquímica, refinerías, generación de energía, oleoductos, minería y metales, farmacéutica o industrias similares) que emplean sistemas modernos de control, con alarmas presentadas en pantalla de ordenador y en un anunciador (Hollifield, 2010), para que la planta resulte más segura y productiva.

El estándar ISA-18.2 aborda el desarrollo, el diseño, la instalación y la gestión de sistemas de alarma en la industria de procesos. Proporciona un marco útil para mejorar las prácticas de gestión de alarmas, ya sea en un sistema instalado, en un sistema a migrar o en la instalación de un nuevo sistema. Se excluye del alcance el *hardware* de la alarma, los sensores del proceso y los elementos finales de control, los sistemas instrumentados de seguridad –excepto para las alarmas generadas por un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)– y los datos de proceso y de sucesos.

Las fases del ciclo de vida de ISA-18.2 son:

- Filosofía. Establece los objetivos del sistema de alarma, los criterios para las alarmas, los procesos y la filosofía empleada en cada etapa del ciclo de vida, así como los requisitos del sistema.
- Identificación. Recogida de alarmas potenciales para determinar si una alarma es necesaria.
- Racionalización. Determina qué alarmas son necesarias, los umbrales de alarma, las prioridades, las acciones del operador y las consecuencias de la inacción. Por lo general, se realiza por múltiples representantes clave del equipo de operación.
- Diseño detallado. Los componentes del sistema de alarma están especificados y configurados en función de los requisitos determinados por la racionalización y la filosofía. Comprende la configuración específica del sistema de control y de diseño de la interfaz.
- Implantación. Incluye las actividades necesarias para instalar una alarma, o sistema de alarma, y llevarlo al estado operativo. La formación del operador es una parte esencial.

- Operación. La alarma y el sistema de alarma están activos y realizan su función. Los cursos de actualización son importantes.
- Mantenimiento. Una alarma, o sistema de alarma, no está operativo, puesto que está en prueba o en reparación.
- Monitorización y evaluación. Es una verificación continua, la medición del rendimiento del sistema de alarma contra objetivos y la identificación de las alarmas que no funcionan conforme a la filosofía de alarma. El estándar recomienda medidas para evaluar el rendimiento y el diagnóstico (ver tabla 2-8).
- Gestión del cambio. Incluye los procesos para proponer y aprobar las modificaciones del sistema de alarma.
- Auditoría. Es una revisión periódica para mantener la integridad del sistema de alarma y los procesos de gestión de alarmas.

Las actividades clave se ejecutan en las diversas etapas del ciclo de vida, y los productos de una etapa son los inputs para la siguiente etapa (Stauffer et al., 2010a). Es posible entrar en el modelo del ciclo de vida por tres fases: filosofía, monitorización y evaluación y auditoría (Honeywell, 2011g). La fase del ciclo de vida de la gestión de las alarmas puede comenzar en la filosofía de alarma para un nuevo sistema, mientras que la fase de monitorización y evaluación puede ser ideal para un sistema existente (Honeywell, 2011g; Siemens, 2010). Una auditoría detallada pone de relieve las deficiencias del sistema de alarma en cualquiera de las etapas.

Siemens (2010) proporciona las siguientes acciones clave al aplicar el estándar ISA-18.2: 1) elaborar un documento de filosofía de alarma para establecer los estándares sobre los que la organización realizará la gestión de alarmas; 2) racionalizar las alarmas para garantizar que cada alarma es necesaria, tiene un propósito y requiere una respuesta del operador; 3) analizar y comparar el rendimiento del sistema con las cifras recomendadas en ISA-18.2. Comenzar por la identificación de las alarmas molestas, ya que se pueden abordar de manera rápida y fácil; 4) implementar la gestión del cambio. Revisar los privilegios de acceso e instalar herramientas para facilitar las comparaciones periódicas de la configuración actual con la base de datos; 5) auditar el funcionamiento del sistema de alarma. Conversar con los operadores sobre el rendimiento del sistema, preguntar si saben qué hacer con la alarma, si son capaces de diagnosticar rápidamente el problema y de determinar las medidas correctivas. También analizar su capacidad para detectar, diagnosticar y responder correctamente y a tiempo; 6) realizar un análisis de las deficiencias en el sistema de control. Considerar el coste frente al beneficio de actualizar el sistema para mejorar su rendimiento y cumplir con el estándar.

Se han desarrollado una serie de informes técnicos de ISA para proporcionar los motivos, las directrices de uso y ejemplos para la aplicación y el uso del estándar (ISA TR18.2.4:2012, ISA TR18.2.5:2012 e ISA TR18.2.6:2012). Otros cuatro informes técnicos de ISA están siendo desarrollados, cubrirán la filosofía de alarmas (ISA TR18.2.1), la identificación y la racionalización de alarmas (ISA TR18.2.2), el diseño básico de alarmas (ISA TR18.2.3) y la gestión de alarma para equipo diseñado por un proveedor especializado para una tarea específica (“*Alarm management for packaged equipment*”) (ISA TR18.2.7).

El informe técnico ISA TR18.2.4:2012 “*Enhanced and advanced alarm methods*” (ISA, 2012c) tiene por objeto ayudar a evaluar cuándo usar métodos avanzados de alarma, los beneficios que se pueden lograr y los posibles desafíos y costes. Si bien se suele lograr una mejora significativa en la función y en el rendimiento del sistema de alarma siguiendo los métodos y los principios básicos, en

algunos casos puede no resultar suficiente para alcanzar los objetivos de la filosofía de alarma en cuanto a rendimiento y orientación al operador. Por ejemplo, debido al estado del equipo, las alarmas no siempre pueden activarse en el momento adecuado para la acción del operador, o pueden activarse cuando no requieren acción.

El informe técnico ISA TR18.2.5:2012 *“Alarm system monitoring, assessment, and auditing”* (ISA, 2012b) proporciona orientación para la monitorización continua y para la evaluación periódica de la actuación. Monitorización, evaluación y auditoría son esenciales para alcanzar y mantener los objetivos de rendimiento del sistema de alarma. Estas actividades pueden identificar oportunidades de mejora en las etapas de la filosofía, la racionalización, el diseño detallado, la implementación, la operación, el mantenimiento y la gestión del cambio.

El informe técnico ISA TR18.2.6:2012 *“Alarm systems for batch and discrete processes”* (ISA, 2012a) presenta principios y técnicas generales para la gestión del ciclo de vida de un sistema de alarma basado en controlador electrónico programable y en tecnología informática de interfaz persona-sistema. Ayuda a identificar y abordar las especificaciones, el diseño, la implementación y la gestión de alarmas que son importantes para los procesos por lotes y discretos. También puede emplearse para minimizar la generación de falsas alarmas.

La aproximación de ciclo de vida seguida por ISA-18.2 es similar a la existente para el estándar ANIS/ISA-84.00.01-2004 parte 1 (IEC 61511-1 Mod) sobre seguridad funcional (Stauffer, Sands y Dunn, 2010a, 2010b). Ambos ciclos de vida comparten muchas semejanzas, interactúan y se solapan (Stauffer et al., 2010b), aunque también muestran importantes diferencias (Stauffer et al., 2010a).

El estándar ISA-18.2 se espera que sea aprobado como buenas prácticas de ingeniería por organismos reguladores (como OSHA en EE.UU. y el Ministerio de Trabajo de Canadá) y por compañías de seguros (Siemens, 2010; Stauffer, 2009; Stauffer et al., 2010b). Convirtiéndose, por lo tanto, en la práctica mínima esperada (Siemens, 2010).

4.3.4.2.2 International Electrotechnical Commission (IEC)

El estándar ANSI/ISA-18.2 ha servido de base para el desarrollo del estándar internacional de IEC 62682 Ed. 1.0, *“Management of alarm systems for the process industries”* (Hollifield, 2010; Tennat, 2013), publicado en noviembre de 2014. Otros referentes para la elaboración del estándar son EEMUA (1999) y NAMUR NA 102 (2003).

Conforme a Dubois (2015), el 90% del estándar IEC 62682 (IEC, 2014) es igual que el estándar ISA 18.2 (ISA, 2009), con una mejor claridad del lenguaje y algunas simplificaciones.

El propósito es el desarrollo, el diseño, la instalación y la gestión de sistemas de alarma en la industria de proceso. Cubre procesos continuos, por lotes y discretos. Aplica a todas las alarmas presentadas al operador, incluye alarmas de sistemas de procesos de control básicos, paneles anunciadores, sistemas instrumentados de seguridad, sistemas contra incendios y de gas así como sistemas de respuesta a emergencias.

4.3.4.2.3 Occupational Safety and Health Administration (OSHA)

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (*Occupational Safety and Health Administration* - OSHA) establece y hace cumplir las normas protectoras de la seguridad y la salud en el lugar de trabajo en EE.UU. OSHA brinda información, capacitación y asistencia a los empleadores y a los empleados (<http://www.osha.gov>).

Cabe destacar el estándar OSHA CFR 29 1910.119 “*Process safety management of highly hazardous chemicals*” (*Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), 1992) y la instrucción OSHA CPL 03-00-010 “*Petroleum refinery process safety management national emphasis program*” (OSHA, 2009), que contemplan el sistema de alarma en el ámbito petroquímico.

El estándar OSHA CFR 29 regulación 1910.119 sobre gestión de seguridad de procesos con materiales químicos altamente peligrosos (OSHA, 1992) se centra en los requisitos para prevenir o reducir al mínimo las consecuencias de escapes catastróficos de productos químicos tóxicos, reactivos, inflamables o explosivos. Estas emisiones pueden resultar en riesgos de toxicidad, incendios o explosiones. Las secciones más relevantes para la gestión de alarmas son: 1910.119 (e)(3)(iii), 1910.119 (f)(2) y 1910.119 (g)(1)(i). Los requerimientos están relacionados con la documentación de alarmas críticas y el entrenamiento de los operadores.

La instrucción OSHA CPL 03-00-010 (OSHA, 2009) describe las políticas y los procedimientos para implantar un programa con el objetivo de reducir o eliminar los riesgos laborales asociados a la liberación catastrófica de productos químicos altamente peligrosos en las refinerías de petróleo.

4.4 GUÍAS DE ESTILO

Para lograr consistencia en el diseño de un sistema, se emplea un conjunto de principios y directrices que permiten transferir conocimientos a los usuarios de la interfaz, denominados guías de estilo. Son, por ejemplo, las directrices que describen cómo asociar los principios abstractos a entornos de programación específicos. Las guías de estilo permiten a los diseñadores tener marcos generales de diseño para ayudar a tomar decisiones correctas en sus diseños (Martínez y Cueva, 2001).

Las guías de estilo pueden ser guías de estilo comercial, que son producidas por los fabricantes de *software* y *hardware*, o guías de estilo corporativas, que son confeccionadas por las propias empresas. Las guías de estilo corporativas suelen construirse a partir de una guía de estilo de la industria. Consideran también los estándares subyacentes, guías de diseño y guías de estilo corporativas ya desarrolladas. El Departamento de Defensa de Estados Unidos ha elaborado la guía de estilo sobre la interfaz persona-ordenador (Department of Defense, 1996).

En la industria nuclear, es común que los proveedores y diseñadores desarrollen sus propias guías de estilo. Instituciones como el Proyecto Halden proporcionan las bases técnicas para la elaboración de directrices.

5 DIFICULTADES Y PROBLEMAS DE LAS ALARMAS

El sistema de alarma juega un papel importante en la operación de la planta, pero también ha planteado a los usuarios de la información algunos retos significativos. Woods et al. (1987) destacan que la presencia inapropiada de alarmas puede ocasionar problemas sustanciales al operador. Connelly (1997) incluso sugiere que los sistemas de alarma pueden dar una falsa sensación de seguridad a los operadores al pensar que todo lo que tienen que hacer, para estar protegidos, es leer y actuar sobre todas las alarmas anunciadas; si las alarmas superan la capacidad de procesamiento del operador, éste errará en algunas de las alarmas y podría perder la protección del sistema de alarma, sin darse cuenta de la carencia.

En esta sección se describe, inicialmente, los principales problemas de las alarmas en el ámbito nuclear, continuando con la situación en otros dominios, para luego exponer las causas de los problemas y finalizar resumiendo las principales dificultades que afrontan los operadores.

5.1 **PRINCIPALES PROBLEMAS DE LOS SISTEMAS DE ALARMA EN CENTRALES NUCLEARES**

Entre los principales problemas de los sistemas anunciadores y de alarma de las salas de control de centrales nucleares, descritos a partir de estudios de campo y experimentales, llevados a cabo a nivel internacional por reguladores, centros de investigación, universidades y estándares cabe destacar:

- Demasiadas alarmas (Alm y Osvalder, 2011, 2012; Berg et al., 2011; Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain, 2008; Davey et al., 1995; Davey, Sheely y Fiegel, 1993; EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Fink, 1990; IAEA, 2001; IEC, 2004; Jönsson et al., 2004; Kemeny Report, 1979; Kinkade y Anderson, 1984; Leger et al., 2006; O'Hara y Brown, 1991; Osvalder y Alm, 2011; Seminara et al., 1979, 1980; Seminara, Gonzalez y Parsons, 1976; Stanton et al., 2000; Thunberg y Osvalder, 2007a). Origina una sobrecarga de alarmas, las alarmas importantes no se distinguen de otras de menor importancia (Berg et al., 2011; Davey et al., 1992; EPRI, 2005; IEC, 2004; Seminara et al., 1979, 1980; Stanton, 1992), los operadores deben filtrar una avalancha de alarmas, confían en su experiencia para identificar las alarmas que son esenciales (Mikkelsen, Johansson y Rissanen, 2011), no pueden procesar toda la información de alarma (EPRI, 2003e, 2004a, 2005), atendiendo sólo a las que están directamente relacionadas con el suceso anómalo (Kinkade y Anderson, 1984), produciendo un retraso en la detección de alarmas importantes (IEC, 2004). La información presentada es difícil de encontrar y de interpretar (Stanton, 1992). Los operadores reciben más información de la que pueden, razonablemente, asimilar cuando se produce una anomalía importante (Rankin et al., 1983; Seminara et al., 1979, 1980).
- Alarmas molestas y espurias o falsas (Alm y Osvalder, 2011, 2012; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2005, 2006; EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Fink, 1990; IEC, 2004; Jönsson et al., 2004; Kinkade y Anderson, 1984; O'Hara, Brown, et al., 2000; Osvalder y Alm, 2011; Rankin et al., 1983; Seminara et al., 1976, 1979, 1980; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000; Thunberg y Osvalder, 2007a). Los operadores se quejan de alarmas que no resultan de desviaciones que requieren atención, debido, por ejemplo, al establecimiento de los puntos de tarado, a

actividades de mantenimiento o de calibración, o a que hay condiciones normales del proceso que tienen asociada una alarma (IEC, 2004; Kinkade y Anderson, 1984). La existencia de alarmas molestas reduce, en gran medida, la información del sistema de alarma y conlleva una gran carga al operador a la hora de distinguir las alarmas infrecuentes, que requieren tomar acciones, de aquellas que no lo requieren (Mumaw et al., 2000). Da lugar a la falta de atención a las alarmas activadas frecuentemente (IEC, 2004). Provoca distracciones, contribuye a la sobrecarga de alarmas, lleva a la pérdida de confianza en el sistema²⁵ (Kinkade y Anderson, 1984; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, et al., 2000; Seminara et al., 1976, 1979, 1980; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000). La falta de confianza en las señales de alarma, como consecuencia de frecuentes falsas alarmas (la baja fiabilidad de la alarma), se denomina *efecto cry-wolf* (Bliss, 1999; Breznitz 1983, citado en Bustamante, Bliss y Anderson, 2007; Breznitz, 1984, citado en Bliss y Chancey, 2014; Seminara et al., 1976) o fenómeno de falsas alarmas (Kinkade y Anderson, 1984; Seminara et al., 1979, 1980). La pérdida de confianza, a su vez, conduce a una reducción en la respuesta del operador (menor frecuencia) y a un aumento en el tiempo de reacción (respuesta tardía) a una señal real de alarma (Bliss y Chancey, 2014; Bliss y Dunn, 2000; Bustamante et al., 2007; Landry y Divvela, 2007; Wickens et al., 2009). Breznitz (1983, citado en Bliss y Dunn, 2000) mostró que el efecto *cry-wolf* se manifiesta en una disminución de la tasa cardíaca y en el nivel de conductancia de la piel. Y puede conducir, a operadores de tareas complejas, a no hacer caso o a ignorar alarmas verdaderas (Bliss, Dunn y Fuller, 1995; Landry y Divvela, 2007; Wickens et al., 2009). De hecho, los resultados de Bliss, Gilson y Deaton (1995) indicaron que la mayoría de los sujetos experimentales, alrededor del 90%, no respondieron a todas las alarmas, sino que ajustaron su tasa de respuesta a la probabilidad esperada de alarmas verdaderas (*probability matching*). No obstante, contrariamente a sus expectativas, en una serie de estudios de laboratorio, Gérard y Manzey (2009), Gérard, Huber, Nachtwei, Schubert y Satriadarma (2011), no encontraron evidencia del efecto *cry-wolf*.

Puede hacer que los usuarios ignoren información de alarma (EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Fink, 1990), sobre todo en los primeros minutos de la anomalía (Fink, 1990). Sorkin (1988, 1989) sugiere que, en numerosas ocasiones, los operadores pueden haber desactivado los indicadores de alarma o advertencia, antes de la ocurrencia del accidente, haciendo referencia, en la industria nuclear, a Seminara et al. (1976). Sorkin (1988, 1989) considera dos razones para desactivar o ignorar la alarma: 1) en algunos casos la señal de alarma es altamente aversiva y puede interferir con funciones importantes del operador y, 2) los operadores perciben que la tasa de falsas alarmas es excesivamente elevada. Vuelve a referir a Seminara et al. (1976), quienes argumentaban que, como consecuencia de falsas alarmas, se origina el síndrome *cry-wolf*, que lleva a la falta de confianza en el sistema. La noción de que el fallo por omisión es más costoso que una falsa alarma, da lugar a que los diseñadores del sistema de alarma opten por incluir un gran número de alarmas, con la subsiguiente reducción del rendimiento del sistema o a que el operador deshabilita el sistema de alarma. Los argumentos de Sorkin (1988, 1989) en relación con que los operadores apagan las alertas continúan siendo aplicables en la actualidad (Matthews, Martin, Tario y Brown, 2009). Las constantes falsas alarmas proporcionan una falsa sensación de seguridad al operador, quien supone que las alertas no son lo suficientemente importantes; por lo tanto, no reciben la

²⁵ La pérdida de confianza en el sistema, debido a la avalancha de alarmas, sucederá, especialmente, en los sistemas más avanzados en los que es fácil añadir nuevos puntos de alarma (Kragt y Bonten, 1983).

atención del operador. Además, el diseño de un método de alerta menos intrusivo puede evitar la distracción de la tarea primaria (Matthews et al., 2009).

- Alarmas permanentes (Seminara et al., 1976; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000).
- Alarmas que faltan. Alarmas que no han sido incluidas en el diseño del sistema de alarma (Fink, 1990).
- Relevancia de la alarma (Fink, 1990) e insuficiente distinción entre la alarma y la indicación de estado (EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Fink, 1990; IEC, 2004; Kinkade y Anderson, 1984; Rankin et al., 1983; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000). La alarma no proporciona información útil (Fink, 1990), lo que Davey et al. (1995) y Leger et al. (2006) denominan una alarma irrelevante. Puede resultar difícil distinguir las condiciones normales de las anómalas (EPRI, 2003e, 2004a, 2005). Los paneles anunciadores, en ocasiones, sirven como un “cajón de sastre” para una serie de mensajes, algunos de los cuales son simplemente informativos, esto es, indicaciones de estado²⁶ (Kinkade y Anderson, 1984; Seminara et al., 1976). Alm y Osvalder (2011, 2012), Jönsson et al. (2004), Osvalder y Alm (2011) y Thunberg y Osvalder (2007a) destacan la falta de prioridad sobre el nivel de riesgo asociado a las distintas alarmas.
- El mensaje de alarma no requiere ninguna acción del operador (Fink, 1990; Mumaw et al., 2000; Seminara et al., 1976) más allá del reconocimiento, proporciona información redundante, fuera del contexto y sin uso operativo inmediato (Davey et al., 1993), esto es, no posee valor operacional, sino que depende de otras alarmas de mayor importancia (IEC, 2004). Este tipo de mensaje proporciona a los operadores una distracción innecesaria, de dos maneras: 1) interrumpe la tarea del operador, ya que cada mensaje anunciado debe ser atendido e interpretado para determinar si se requiere una nueva acción y 2) desordena las pantallas anunciadoras presentadas por ordenador y los registros de impresora, lo que dificulta que el operador localice los mensajes importantes sobre los que debe actuar (Davey et al., 1993).
- Diseño del sistema de alarma sin ser muy sensible al contexto: consideración de los modos de operación de la planta (Alm y Osvalder, 2011; Brown et al., 2000; Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2005, 2006; Carvalho, Dos Santos, Gomes y Borges, 2008; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008; EPRI, 2005; IAEA, 2001; Mumaw et al., 2000; Sørenssen et al., 2002; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000; Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009; Vicente, 2007; Vicente y Burns, 1995, 1996; Vicente et al., 1997, 2001; Woods et al., 1987). Es habitual tener un número de anunciadores activos dentro de la sala de control, teniendo el operador que discriminar los anunciadores normales para la condición y estado de la planta (Bovell, Carter y Beck, 1997).
- Falta de estandarización del diseño de las ventanillas y del etiquetado del anunciador (Rankin et al., 1983; Seminara, 1988): diseño inadecuado de mensajes anunciadores, ausencia de estandarización en los caracteres, limitada legibilidad, incorrecto etiquetado, o mensajes ambiguos (Kinkade y Anderson, 1984; Rankin et al., 1983; Seminara, 1988). En general, diversos aspectos del diseño de factores humanos, que influyen en la presentación de la información de alarma de forma que ayude a los operadores a asimilar, entender y actuar (Fink, 1990). La leyenda del anunciador no siempre describe el problema con el suficiente nivel de detalle, a menudo hacen referencia a otro panel anunciador localizado fuera de la sala de control principal, mientras que en otras ocasiones la ventanilla del anunciador describe diversas opciones (por ejemplo, HIGH/LOW LEVEL OR PRESSURE) (Seminara et al., 1976,

²⁶ Roth y O’Hara (2002) establecen que los mensajes de estado son lo que se espera que suceda y que las alarmas son lo que se espera que suceda y no ocurrió, o lo que no debería haber ocurrido pero sucedió.

1980). Además, la leyenda del anunciador no está dimensionada para ser leída desde la estación de trabajo del operador (Seminara et al., 1979, 1980). Alarmas con mensajes crípticos (Davey et al., 1995; Leger et al., 2006). Abreviaturas del texto mostrado en las ventanillas anunciadoras en un idioma que no es el nativo de los operadores (en un simulador de Brasil, los acrónimos se presentaban en inglés resultando problemático para los operadores de lengua portuguesa) (Luquetti dos Santos, Teixeira, Ferraz y Carvalho, 2008).

- Infrautilizar las técnicas de codificación visual y audible (Seminara et al., 1976, 1980), que permiten una localización y un diagnóstico de los transitorios de una forma más exacta y rápida (Seminara et al., 1980).
- Variabilidad injustificada de las indicaciones de alarma audibles (intensidad del sonido de la alarma) y visuales (intensidad de la iluminación de la ventanilla o tasa de intermitencia que dificulta diferenciar el estado de la alarma) (Kinkade y Anderson, 1984).
- Ubicación inadecuada del anunciador. Los anunciadores no siempre se encuentran encima o cerca de las pantallas y los controles (IAEA, 2001; Rankin et al., 1983; Seminara et al., 1976, 1979, 1980, 1988).
- Ubicación y diseño inadecuado de la secuencia de operación de los controles. El control para interactuar con el sistema de alarma no está próximo al anunciador, el operador puede silenciar la alarma antes de haber atendido al mensaje, por lo que éste puede resultar encubierto por otros mensajes anteriormente reconocidos (Kinkade y Anderson, 1984). En ocasiones, no se diferencian los tipos de controles, por ejemplo, en forma o en tamaño, por lo que los operadores pueden confundir los controles y, por tanto, degradar la realización de la tarea (Kinkade y Anderson, 1984).
- Existencia de alarmas sin reconocer (EPRI, 2005; IEC, 2004; Sørenssen et al., 2002; Stanton y Baber, 1995; Woods, 1985). De forma contraria, alarmas que se reconocen antes de determinar su localización (es una tendencia ante alarmas repetidas) (Stanton, 1992; Stanton et al., 2000), silenciar y reconocer alarmas sin mirar a los paneles anunciadores (Kinkade y Anderson, 1984; Seminara et al., 1976, 1979, 1980), sobre todo ante una avalancha de alarmas, incluso el operador puede a veces aceptar una señal sólo para evitar la señal audible (Sorkin, 1988, 1989; Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995). El reconocimiento de numerosas alarmas es a veces una tarea que consume tiempo (IAEA, 2001).
- Los sistemas anunciadores convencionales *hardwired* y los paneles de operación tienden a separar indicadores cualitativos, displays cuantitativos y controles en tres zonas distintivas, lo que crea problemas de operación debido a la dificultad de la asociación entre ellos (Seminara et al., 1980).
- Las anomalías múltiples son difíciles de detectar (IAEA, 2001), en especial la detección de un segundo suceso, como se ha expuesto anteriormente (S. Baker, Gertman, et al., 1985; S. Baker, Hollnagel, et al., 1985; Fujita et al., 1988; Marshall et al., 1987; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Reiersen, Marshall y Baker, 1987).

A modo de resumen, el fallo de los sistemas de alarma no suele ser que no muestren la información necesaria al operador. Los problemas más comunes durante anomalías en el área nuclear incluyen la anunciación de demasiadas alarmas, de alarmas falsas, de alarmas molestas, y la escasa distinción entre las alarmas y los cambios de estado. La mayoría de los autores suelen afirmar que el problema más significativo de las alarmas es el elevado número de mensajes de alarma, avalancha de alarmas, presentado simultáneamente al operador.

5.2 PROBLEMAS DE LAS ALARMAS EN OTROS DOMINIOS

Se ha incluido una sección que resume las dificultades de las alarmas en otros dominios para poner de manifiesto que gran parte de ellas son comunes. Además, se incluyen para una posible fertilización cruzada de un dominio a otro. En cuanto a las causas de las alarmas, en el siguiente apartado, se ha procedido a exponerlas conjuntamente para todos los ámbitos.

El sistema de alarma debe ofrecer apoyo al operador durante todas las fases de un incidente: detección del suceso anómalo, diagnóstico de la causa, formulación de medidas correctivas y ejecución de la acción correctiva (Andow, 1985). En cambio, Lees (1983) afirma que existen dificultades en los sistemas de alarma tanto en la detección de una condición anómala, debido al nivel de ruido por la gran cantidad de alarmas menos significativas o espurias, como en el diagnóstico de su causa, que puede ser una tarea difícil, en parte, por una discriminación incompleta entre fallos y, en parte, por la forma en que se presenta la información.

Entre los principales problemas detectados en el control de procesos cabe destacar:

- Demasiadas alarmas (Hopkins, 2000; Koene y Vedam, 2000; Kortlandt y Kragt, 1978; Kragt y Bonten, 1983; Lees, 1983; Queirolo, 2011), con una elevada tasa de alarmas (Queirolo, 2011; Rothenberg, 2009). En una avalancha de alarmas, la mayoría de los mensajes no proporciona información adicional al operador (Kortlandt y Kragt, 1978).
- Anomalías operativas significativas producen un número inmanejable de alarmas (Koene y Vedam, 2000; Rothenberg, 2009). Incluso sucesos operacionales menores generan una gran cantidad de alarmas (Koene y Vedam, 2000).
- Alarmas permanentes (Koene y Vedam, 2000; Rothenberg, 2009).
- Alarmas espurias o molestas (Kragt y Bonten, 1983; Lees, 1983).
- Alarmas que no son necesarias (alarmas que no tienen importancia) (Andow, 1985; Koene y Vedam, 2000). Especialmente este problema resulta exacerbado en los sistemas avanzados por la facilidad de especificar alarmas en el sistema DCS (Andow, 1985; Koene y Vedam, 2000; Kortlandt y Kragt, 1978; Lees, 1983).
- Distinción entre alarmas y mensajes de estado (Andow, 1985; Kortlandt y Kragt, 1978; Lees, 1983).
- Asignación de importancia o prioridad a la alarma (Koene y Vedam, 2000; Nimmo, 2008). Demasiadas alarmas de alta prioridad (Rothenberg, 2009).
- Alarmas que no requieren acción del operador (Koene y Vedam, 2000; Kragt y Bonten, 1983; Rothenberg, 2009) o alarmas que el operador no está seguro qué hacer con ellas (Koene y Vedam, 2000; Rothenberg, 2009). Kragt y Bonten (1983) encontraron que sólo un 7% de las alarmas resultó en una acción del operador. Mientras que el primer caso tiende a indicar que la alarma no tiene un propósito, el segundo sugiere que los procedimientos de operación no están vinculados a la activación de la alarma (Koene y Vedam, 2000).
- Alarmas asociadas a acciones del operador. Cuando el operador realiza determinadas acciones, espera que se activen ciertas alarmas (éstas son señales de retroalimentación de que el sistema funciona adecuadamente) (Kortlandt y Kragt, 1978; Kragt, 1983; Kragt y Bonten, 1983; Lees, 1983).
- Sensibilidad al contexto: modo de operación (Andow, 1985; Koene y Vedam, 2000; Kortlandt y Kragt, 1978; Lees, 1983). Da lugar a un gran número de alarmas. Los sistemas *hardwired* son especialmente insensibles a los requisitos de operación (Andow, 1985).

- Alarmas debidas a trabajos de mantenimiento en instrumentos (Lees, 1983).
- Falta de una filosofía clara del sistema de alarma en la planta (Kortlandt y Kragt, 1978; Rothenberg, 2009).
- No existir una directriz de diseño del sistema de alarma (Andow, 1985), ni una guía sobre cuándo y cómo añadir una alarma (Rothenberg, 2009).
- Suele resultar económicamente más barato especificar una alarma, en lugar de que ocurra un disparo, a pesar de que el operador puede encontrar que las medidas correctivas son muy difíciles de llevar a cabo y, a su vez, causar mayores costes de operación (Andow, 1985).
- Incidentes en donde los operadores no detectaron datos clave (Rothenberg, 2009; Stanton, 1996a), debido sobre todo al enmascaramiento por la presencia de otras alarmas (Stanton, 1996a).
- No recordar la última vez que probaron las alarmas (Rothenberg, 2009).
- Falta de confianza en el sistema (Kortlandt y Kragt, 1978; Kragt y Bonten, 1983; Lees, 1983), por lo que a veces desactivan señales de alarma (Lees, 1983).
- La señal audible de las alarmas resulta irritante, por lo que a veces los operadores aceptan una señal sólo para evitar la señal audible (Hopkins, 2000; Kragt, 1983; Kragt y Bonten, 1983; Sorkin, 1988, 1989).
- Existencia de alarmas sin reconocer (Campbell Brown, 1998; Lees, 1983; Shaw, 1993).

Marvan (2005) identifica doce obstáculos en la implantación efectiva de un programa de gestión de alarmas en la industria de control de procesos, que incluyen: gestión inadecuada de proyectos; uso de herramientas de análisis erróneas; fallos en la evaluación comparativa del rendimiento del sistema de alarma existente; ausencia de directrices claras para la racionalización de la alarma; no incluir operadores en el proceso de diseño; seleccionar la herramienta de análisis por el coste y no por sus características; uso inapropiado de la automatización; centrarse exclusivamente en las alarmas anunciadas sin considerar las acciones del operador; tratar los datos de las alarmas sin considerar las prioridades; asumir que los usuarios leerán los manuales sin proporcionarles formación práctica; reformar todo el sistema simultáneamente; fallar en la asignación de roles y de responsabilidades.

Los problemas de los sistemas de alarmas en refinería de petróleo (Bransby, 2000; Connelly, 1997²⁷; Grosdidier et al., 2003; Shahriari et al., 2006) han llevado a Connelly (1997) a sugerir que tomados en conjunto, el efecto aditivo de los problemas puede hacer un sistema de alarma inútil o incluso “perjudicial”, habiendo observado a operadores deshabilitar el sistema de alarma:

- Demasiadas alarmas (Bransby, 2000; Connelly, 1997; Grosdidier et al., 2003; Shahriari et al., 2006), dando lugar a una sobrecarga de alarmas (Shahriari et al., 2006).
- La tasa de alarmas es a menudo abrumadora (Bransby, 2000; Shahriari et al., 2006), excede las capacidades de procesamiento de información del operador (Connelly, 1997), no es posible leer la alarma, y mucho menos entender y responder a la alarma (Bransby, 2000), es difícil concentrarse en la información importante y, a veces, la capacidad de las pantallas es insuficiente, lo que resulta en pérdida de información (Shahriari et al., 2006).
- Alarmas permanentes, activas un largo tiempo durante operación normal (Shahriari et al., 2006).
- Alarmas que se repiten (Bransby, 2000; Connelly, 1997).

²⁷ Problemas similares se encuentran en la industria de procesamiento por lotes (Connelly, 1997).

- Alarmas múltiples para una única condición de alarma (Connelly, 1997).
- Alarmas de escaso valor para el operador y alarmas que son indicaciones de estado (Bransby, 2000).
- Asignación incorrecta de la prioridad a la alarma (Bransby, 2000; Connelly, 1997; Grosdidier et al., 2003; Shahriari et al., 2006), con un porcentaje elevado de alarmas de máxima prioridad (Bransby, 2000; Grosdidier et al., 2003).
- Alarmas que no requieren acción del operador (Bransby, 2000; Connelly, 1997).
- Alarmas en condición de operación normal por no seguir el criterio de panel oscuro (Connelly, 1997).
- Mensajes ambiguos o confusos (Connelly, 1997).
- No usar el sistema de alarma (Bransby, 2000) o desactivar las alarmas, confiar únicamente en las actividades de vigilancia de información crítica del proceso (Connelly, 1997). Bransby (2000) argumenta que el hecho de que el operador no use el sistema de alarma no es por negligencia, en cambio corresponde a una estrategia práctica para gestionar el estrés generado por una anomalía en la planta.

En la industria de bioprocesos (medicamentos) hay alarmas molestas que: frustran a los operadores, dan lugar a una investigación superflua de las desviaciones del proceso y a la percepción de que el proceso no está bajo control, ocasionando una sobrecarga de información en los operadores (Alford, 2006).

En la sala de control de procesos de una empresa de fabricación de acero, Han et al. (2007) hallaron los siguientes problemas en el sistema de alarma: no clasificar sistemáticamente la gravedad; no informar a los operadores, a través de la interfaz del ordenador o por sonido, reconociendo los operadores las situaciones de alerta por ellos mismos o por circuitos cerrados de televisión; señales de advertencia que no consiguieron atraer la atención de los operadores ni ser percibidas fácilmente; no mostrar señales visuales junto con señales audibles. Por consiguiente, a menos que los operadores fijaran sus ojos en la pantalla, es posible que no reconocieran la presencia de alarmas, siendo éste considerado como el problema más grave, de hecho, Han et al. (2007) detectaron una situación de emergencia en la instalación que no llamó inmediatamente la atención del operador.

Los problemas de diseño del sistema de alarma en la minería de carbón incluyen (Best et al., 1985):

- Demasiadas alarmas. Una proporción significativa de las alarmas es debida a variables oscilantes del proceso, que sí pueden ser de gran valor para los ingenieros de mantenimiento, pero, a menudo, tiene escaso o ningún valor para el operador.
- Falta de jerarquía de las alarmas en cuanto a su importancia. Se presentan alarmas críticas junto con alarmas de menor importancia.
- Falta de distinción entre alarma e información de estado.
- Alarmas que no requieren tomar una acción.
- Limitaciones asociadas con la presentación alfanumérica de la alarma, que en otras industrias han dado lugar a perder o ignorar información y a errores.
- Reconocer la alarma, sin identificar cuál está sonando. Cuanto mayor resulta el número de alarmas irrelevantes, mayor será la probabilidad de que los operadores no detecten alarmas relevantes.

- No detectar la alarma de la lista de alarmas, en ocasiones, si el operador no respondía inmediatamente cuando ésta aparecía.
- Alarma que se elimina automáticamente para presentar la siguiente alarma, una vez que el espacio disponible para las alarmas en la lista estaba repleto. El operador puede llevar a cabo acciones inapropiadas al no ser plenamente consciente de todos los mensajes relevantes de alarma, puesto que las alarmas han sido borradas y permanecen en cola de la impresora. Como resultado, los operadores de la sala de control a menudo pierden confianza en el sistema de alarma.
- Disponer de una impresora, como un método de copia, para comprobar qué alarmas se han presentado, después de que fueran eliminadas de la PVD. En ciertas circunstancias, las impresoras no han sido capaces de imprimir las alarmas cuando se anuncian y, además, las pantallas PVD no disponen de capacidad para mostrar todas las alarmas de forma simultánea.

Li, McKee, Horberry y Powell (2011)²⁸ analizaron dos tipos diferentes de plantas de procesamiento de minerales, una de cobre y otra de oro, encontrando las siguientes deficiencias:

- Demasiadas alarmas. La atención del operador se dirigía principalmente a las alarmas, sin embargo, en ambas plantas los operadores resultaron seriamente disturbados por numerosas falsas alarmas. Los operadores sobrecargados pueden no ver alarmas críticas que requieren intervención humana. En una planta existía avalancha de alarmas en operación normal y anómala, el operador no tenía tiempo para leer y entender las alarmas. Las alarmas no apoyaron eficazmente a los operadores en la detección de anomalías que requerían intervención humana.
- Alarmas molestas. Las alarmas se convirtieron en una importante fuente de distracción e interrupción del trabajo del operador. En una planta, los operadores emplearon un promedio del 30% de su tiempo para hacer frente a diversas alarmas molestas. En la otra planta, los operadores ignoraron las alarmas la mayor parte del tiempo, ya que carecían de confianza en estas alarmas debido a su limitada utilidad.
- Falsas alarmas.
- Falta de apoyo para la detección temprana. Además de existir sobrecarga de alarmas, cierta información crítica de la tarea no se presentaba en la interfaz como alarma. Como resultado, la detección del operador ocurría a menudo tarde, quedando un tiempo limitado para gestionar las anomalías.
- La estructura y el contenido de los mensajes de alarma (ordenados por tiempo; cada mensaje de alarma constaba de un identificador numérico, un identificador de la denominación y una nota de la desviación del equipo o del proceso) no ayudó a los operadores a interpretar rápidamente el contexto y a planificar de manera eficiente. Además, los mensajes de alerta con frecuencia llegaban demasiado tarde, quedando escaso tiempo para el control del operador.
- Rechazo de tecnologías y de alarmas. Los operadores desconfían o rechazan las alarmas no sólo porque sean demasiado complicadas de por sí, sino por no estar diseñadas para facilitar la comprensión del operador. Las principales razones identificadas son la filosofía de diseño que

²⁸ A diferencia de otras industrias de proceso, en algunas plantas de procesamiento de minerales no hay en la sala de control operadores dedicados a monitorizar los sistemas de control. En cambio, los operadores de campo, por lo general operadores de molienda y de flotación, utilizan parte de la información de los sistemas de control para monitorizar la producción dentro de su sección. Por lo tanto, no es de extrañar que a veces la sala de control estuviera vacía mientras se anunciaba una alarma crítica (Li et al., 2011).

ignora las limitaciones humanas y las necesidades de información para apoyar el control basado en el conocimiento, así como sensores poco fiables.

Traub y Hudson (2007) compararon el sector marítimo y de transporte ferroviario, encontrando que comparten muchas similitudes con respecto a las alarmas. Históricamente, los entornos operacionales rara vez han aprovechado al máximo un enfoque sistemático para la gestión de alarmas. Como resultado, los operadores se quejan de carga mental, estrés, avalancha y enmascaramiento de alarmas, causado por un número excesivo de alarmas innecesarias, espurias o repetitivas, dando lugar a dificultades en la identificación de la prioridad de la alarma. *Health and Safety Executive* (HSE, 1994) señala que los operadores de terminal marítima habitualmente deshabilitan una determinada alarma (relativa a la velocidad del viento), como sucedió en el incidente de Havkong (descrito posteriormente) y, además, añade que también sucede en otras industrias.

Usher y Stallard (1997) llevaron a cabo una encuesta, en 1994, a cuarenta y cuatro miembros de tripulación de cinco fragatas Tipo 23 con respecto a sus experiencias en las instalaciones del centro de control de barcos. Encontraron mayor insatisfacción en las alarmas y advertencias que en cualquier otra área. Las críticas se referían a la presentación de las alarmas, las herramientas para manejarlas y la mala calidad de los datos, en concreto: no existir una anunciación secundaria audible de los grupos de advertencias; todas las anunciaciones audibles suenan igual y provienen sólo de estribor; problemas con las lámparas; la pantalla de la alarma no se desplaza; para cancelar alarmas requiere alejarse de la consola principal; en el panel de plasma se presenta la primera página de alarmas, en vez de la última página; las alarmas primarias y secundarias deberían estar separadas en la impresora; no existe un botón de aceptar alarmas en el puesto del supervisor; los canales con fallos no se muestran con suficiente claridad y no son un aviso de grupo primario; se utilizan demasiadas lámparas de aviso; las alarmas y los avisos no tienen prioridad; las continuas alarmas que se producen durante las paradas del generador diésel distraen; a veces se origina una advertencia cuando las máquinas funcionan normalmente; las alarmas menores parecen sonar demasiado a menudo después de rearmarlas.

Ahlstrom (2003) realizó una encuesta a veinte especialistas de Control del Tráfico Aéreo (ATC) de Estados Unidos de América para identificar las áreas problemáticas de los sistemas de alarma audibles. Ahlstrom (2003) encontró que los cinco problemas (de entre quince elementos identificados en una revisión de la literatura sobre problemas con alarmas audibles) que recibieron una calificación promedio más alta fueron: las alarmas se confunden fácilmente porque suenan igual; las alarmas se apagan con demasiada frecuencia, sobre todo las falsas alarmas; las alarmas son molestas, excesivamente largas, sin dejar de sonar incluso después de reconocer el problema, o no proporcionan información pertinente; difícil localizar el origen de las alarmas, especialmente al desactivarse simultáneamente múltiples alarmas; y demasiadas alarmas se desactivan al mismo tiempo, ante numerosas alarmas resulta complicado aprender el significado de cada una. Otros problemas, de ámbito más general, incluyen una gran cantidad de alarmas, alarmas molestas, alarmas que eran muy estridentes, alarmas que interferían con la comunicación por voz, alarmas fáciles de confundir o demasiadas falsas alarmas. Friedman-Berg y Allendoerfer (2008) señalan que las alarmas molestas²⁹ pueden causar problemas, al distraer al controlador aéreo y pueden llevar a insensibilización. Las

²⁹ Friedman-Berg y Allendoerfer (2008) establecen que en el ATC existen siete categorías principales de alarmas (alertas) molestas: no requiere acción; el controlador está solucionando el problema, no estando completamente resuelto; no tiene impacto operacional en el rol del controlador; irritante (la alerta es muy llamativa o dura más de lo necesario para llamar la atención); emplear separación no radar; alarma repetida después de que el controlador ha tomado una acción o ha decidido que la acción no es necesaria; error de seguimiento.

interrupciones audibles frecuentes e irrelevantes pueden obstaculizar la ejecución de tareas visuales, lo que podría ser un problema serio en un dominio altamente visual como el ATC (Friedman-Berg y Allendoerfer, 2008).

Los problemas fundamentales en los sistemas de alarma en la industria de las telecomunicaciones se deben a sobrecarga de alarmas, alarmas permanentes, falta de prioridades y mensajes incomprensibles (Wallin, 2009).

Mikkelsen et al. (2011) estudiaron las necesidades y el rol de los operadores, la forma en que operaban y tomaban decisiones en el ámbito de los sistemas de control de supervisión de la red eléctrica, llevando a cabo estudios de campo, entre 2008 y 2010, en dieciséis salas de control de compañías eléctricas de Estados Unidos, India, Suecia, Emiratos Árabes y Omán. Encontraron que uno de los temas más relevantes fue la sobrecarga de información que los operadores experimentaron en situaciones críticas (Mikkelsen et al., 2011). Un suceso importante en el sistema puede conllevar un gran número de alarmas, presentadas en lista de alarmas, que el operador necesita priorizar y encontrar la causa raíz y entender cómo resolver la situación actual. Un operador describió una situación en donde recibió más de 60 páginas de alarmas en 30 segundos, perdiendo alarmas importantes de una línea de transmisión que tenía una elevada carga. Así, una gran parte del trabajo diario de los operadores está en consultar las páginas de alarmas (Mikkelsen et al., 2011).

En el dominio de la medicina, las alarmas se utilizan en muchas aplicaciones clínicas, entre los principales problemas de las alarmas destacar (Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006; Haas y Edworthy, 1996; Xiao y Seagull, 1999; Xiao et al., 2003, 2004):

- Demasiadas alarmas y se utilizan con demasiada frecuencia (Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006).
- Demasiadas falsas alarmas para que el usuario confíe en el sistema (Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006).
- Difícil distinguir unas alarmas de otras (Edworthy y Hellier, 2005, 2006). Alarmas que resultan confusas debido a su número y a sus cualidades acústicas (Edworthy y Adams, 1996).
- Desconocer el significado de la alarma audible (Haas y Edworthy, 1996).
- Propiedades acústicas que suelen estar mal diseñadas (Edworthy y Hellier, 2005, 2006; Xiao y Seagull, 1999).
- Alarmas cada vez más sonoras y estridentes (Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006; Xiao et al., 2004), suelen instalarse en una lógica de “mejor seguro que lo siento” (Edworthy y Hellier, 2005, 2006).
- Alarma difíciles de ignorar (Xiao et al., 2004).
- Alarmas que resultan irritantes (Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006) y disruptivas (Xiao et al., 2004).
- Las alarmas no están integradas en el entorno de trabajo, no se relaciona el sonido de la alarma con los problemas médicos individuales (Edworthy y Adams, 1996).
- Falta de comprensión sobre qué tipo de información proporcionan las señales audibles de advertencia (Xiao y Seagull, 1999).
- No siempre se responde a las alarmas y, en ocasiones, desactivan o deshabilitan (apagan) algunas alarmas (Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006; Haas y Edworthy, 1996; Xiao et al., 2003, 2004), antes de atender al problema (Edworthy y Adams, 1996), interfiriendo o dificultando la ejecución de las tareas (Edworthy y Hellier, 2005, 2006;

Haas y Edworthy, 1996), debido sobre todo a numerosas falsas alarmas (Edworthy y Adams, 1996).

Xiao et al. (2003, 2004) argumentan que la problemática de las alarmas ha sido considerada como una limitación de la percepción (incapacidad para escuchar) y, consecuentemente, las soluciones propuestas han estado dirigidas predominantemente a lograr que las alarmas sean oídas. Además, en el diseño de las alarmas no siempre se ha tenido en cuenta la capacidad cognitiva y los mecanismos de procesamiento humano (Edworthy y Hellier, 2006), ni los requisitos para proporcionar a los operadores información relevante y a tiempo (Xiao y Seagull, 1999). Consiguientemente, Xiao et al. (2003, 2004) concluyen que la consideración de diversos factores, en especial los múltiples niveles de la organización, puede ser una forma de resolver racionalmente las dificultades de las alarmas; esto es, los problemas que a primera vista son causados por alarmas en realidad pueden reflejar cuestiones organizativas más amplias. Por último, Edworthy y Hellier (2006) consideran que en la atención clínica, por lo general, ha habido un menor esfuerzo en el diseño y el tratamiento de las alarmas que en la industria nuclear.

5.3 CAUSAS DE LAS DEFICIENCIAS DE LAS ALARMAS

A la hora de identificar las causas de las deficiencias de las alarmas, diversas son comunes a distintos dominios, por lo que se exponen de forma conjunta en este apartado. Las causas se encuentran, en parte, en la forma en que los sistemas de alarma han sido diseñados (Andow, 1985; Bransby, 2000, 2001; EEMUA, 1999; Fink, 1990; IEC, 2004; Jenkinson, 1997; Koene y Vedam, 2000; Rankin et al., 1983; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000; Woods et al., 1987). Existen limitaciones en el diseño en cuanto al procesamiento de señales de alarma y al procesamiento de la presentación de alarmas (IEC, 2004), y a diseñar alarmas basadas en operación normal o la filosofía de *una medida-un indicador* (Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2005, 2006; Carvalho, Dos Santos, Gomes y Borges, 2008; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008; IAEA, 2001; Koene y Vedam, 2000; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000).

El proceso de diseño debe ser riguroso, cada alarma debería estar justificada (Bransby, 2001; EEMUA, 1999; ISA, 2009; Shaw, 1993). Parte de los problemas de las alarmas se deben a una consideración insuficiente del rol y de las necesidades del operador en la filosofía de gestión de alarmas (Wilson, 1998). También hay una tendencia a configurar las alarmas por diseñadores de sistemas individuales de la planta, de una forma aislada de otros diseñadores y de los usuarios del sistema (Jenkinson, 1997; Seminara y Parsons, 1979), conduciendo a una falta de coherencia en la elección y la prioridad de las alarmas (Bransby y Jenkinson, 1998b, 1998c).

Un aspecto adicional es que, generalmente, en el diseño del sistema de alarma de los ingenieros suele existir una contribución limitada de especialistas en factores humanos (Niwa y Hollnagel, 2001; Stanton, 1991, 1992; Stanton, Booth y Stammers, 1992), y que los expertos en factores humanos deberían participar en el proceso de diseño del sistema de alarma desde las etapas iniciales del ciclo de vida del diseño (Beattie et al., 1996; Best et al., 1985; Luquetti dos Santos et al., 2013). Siguen existiendo problemas relacionados con aspectos de factores humanos, a pesar incluso de la aplicación de tecnología avanzada (Best et al., 1985; I. S. Kim y O'Hara, 1993; O'Hara y Brown, 1991).

Así mismo, los operadores deberían también influir en el diseño del sistema de alarma, no sólo en el proceso de revisión del sistema, se necesitaría un menor esfuerzo para revisar y reestructurar el sistema de alarma (Marvan, 2005; Mattiasson, 1999). Los diseñadores no son conscientes del problema en el diseño, rara vez reciben retroalimentación del personal de operación (Andow, 1985) o de la planta de un modo estructurado formalmente (Seminara y Parsons, 1979). En ocasiones, los operadores notan la existencia de datos insuficientes en otras fuentes de información de la interfaz, por lo que añaden alarmas para que les avisen cuando el proceso se esté alejando de los parámetros de operación deseados (Koene y Vedam, 2000). La perspectiva de los diseñadores puede no siempre coincidir con la de los usuarios (Busby y Hibberd, 2002)³⁰; un enfoque de factores humanos vería necesario que los dos puntos de vista estén de acuerdo (Stanton et al., 1992). Es importante tomar en consideración que los operadores puedan emplear eficientemente la información de alarma, el uso de la información de la alarma es un fenómeno complejo (Niwa y Hollnagel, 2001). Además, sin embargo, incluso con la mejor tecnología e ingeniería, el efecto de la optimización del sistema de alarma no dura perpetuamente (Yuki, 2002).

Brown et al. (2000), O'Hara y Brown (1991) y O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) argumentan que la combinación de la función de anunciación (relativa al rol de indicación del estado) y la función de alarma en un único sistema ha contribuido a las dificultades que experimentan los operadores en condiciones de gran cantidad de alarmas. Pudiendo reducirse significativamente el número de alarmas que el operador tiene que afrontar, si se separan ambas funciones, lo que resulta fácil en una sala de control avanzada (Brown et al., 2000; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

Xiao y Seagull (1999) atribuyen también parte de los problemas del diseño de la alarma a la falta de distinción de los diversos roles. Consiguientemente, Xiao y Seagull (1999) proponen que el papel esté en informar del estado del proceso (como un indicador de los cambios: el momento y la forma de presentar los cambios), y no como una manera de interpretar los cambios en el estado del proceso (el significado de los cambios). Puesto que la alarma es un tipo de señal, entre otras, que proporciona información a los operadores, los problemas con las alarmas surgen de la interpretación del significado del suceso asignado por la alarma (Xiao y Seagull, 1999). Los operadores necesitan disponer de mejor información sobre lo que ha cambiado, además de o tal vez, en lugar de lo que el cambio puede significar, por lo que, como consecuencia, argumentan que los diseñadores de alarmas deberían centrarse en proporcionar la información, no en la forma de interrumpir la atención (Xiao et al., 2003, 2004).

No siempre resulta fácil evaluar y responder a las alarmas, lo que Niwa y Hollnagel (2001) atribuyen a que no se produce un emparejamiento uno-a-uno entre los estados del sistema (del proceso) y las alarmas, entre las alarmas y los síntomas, o entre los síntomas y las respuestas. Las alarmas de bajo nivel, relativas a que una única medida o parámetro ha superado un determinado umbral, son valiosas porque son altamente fiables y muy detalladas, apoyan la función de alerta, pero dejan la selección de la respuesta al operador, quien tiene que interpretar la multitud de alarmas (Niwa y Hollnagel, 2001).

³⁰ Busby y Hibberd (2002) argumentan que un factor causal importante en muchos fallos de los sistemas complejos y las secuencias de accidentes posteriores está en un desajuste entre las intenciones de los diseñadores del sistema y de los operadores.

Larsson et al. (2006) sostienen dos razones para explicar que los problemas de alarma sigan, en gran parte, sin resolver. Primero, cada tipo de problema de alarma exige una solución diferente, por lo tanto, una sola tecnología no será suficiente para resolverlos todos. Segundo, algunas dificultades de las alarmas han carecido de soluciones técnicas viables; para el análisis de causa raíz de las *cascadas de alarma* se necesita un método eficaz, demandando las soluciones propuestas una extensa ingeniería del conocimiento o de modelado.

La visión que tienen los estándares sobre las dificultades de los sistemas de alarma se resume en cuanto a IEC 62241 (IEC, 2004) e ISA-18.2 (ISA, 2009). El estándar IEC 62241 (IEC, 2004) atribuye, como una de las causas de los problemas, a los estilos de operación que crean los operadores con el fin de hacer frente a las dificultades de factores humanos. Por ejemplo, para aliviar el problema del aumento de carga de trabajo, algunos operadores no reconocen las alarmas, pero esto puede causar un retraso en la detección de alarmas importantes. Las recomendaciones del estándar ISA-18.2 (ISA, 2009) abordan los problemas de gestión de alarmas más comunes (exida, 2009; Siemens, 2010), que pueden cubrirse con la gestión del ciclo de vida (ver la tabla 5-1).

Tabla 5-1. *Problemas de Gestión de Alarmas que Pueden Abordarse con la Gestión del Ciclo de Vida de ISA-18.2 (exida, 2009; ISA, 2009; Siemens, 2010)*

Problema de gestión de alarmas	Causas
Las alarmas generadas son ignoradas por el operador.	Alarmas molestas, <i>hardware</i> defectuoso, alarmas redundantes, alarmas en cascada, configuración incorrecta de alarmas, las alarmas no se han racionalizado.
Los operadores no saben cómo responder.	Falta de formación y procedimiento de respuesta a la alarma insuficiente.
Anomalías menores en la planta generan un gran número de alarmas.	La tasa media de alarmas es demasiado alta. Alarmas redundantes, en cascada o que no se han racionalizado.
La pantalla de alarmas está llena de alarmas, incluso cuando no acontece nada erróneo.	Alarmas molestas, <i>hardware</i> defectuoso, alarmas redundantes, alarmas en cascada, configuración incorrecta de alarmas, las alarmas no se han racionalizado.
Algunas alarmas están presentes en la pantalla de alarmas continuamente durante largos períodos de tiempo (>24 horas).	La acción correctora es inefectiva, el equipo está roto o fuera de servicio, cambios en las condiciones de la planta.
Durante las anomalías, los operadores reciben tantas alarmas que no saben cuáles son las más importantes.	Priorización incorrecta de alarmas. No se usan técnicas de alarma avanzadas.
Cambian los parámetros de ajuste de la alarma de un operador a otro.	Falta de gestión de los procedimientos de cambio.

5.4 RESUMEN DE LOS PROBLEMAS DE LAS ALARMAS

La eficacia del sistema de alarma sigue resultando problemática en las plantas de energía nuclear de hoy en día. No obstante, no es la única instalación tecnológicamente compleja que experimenta la situación, desde numerosos dominios están tratando de resolver los problemas asociados a las alarmas. En el apartado se han presentado las principales dificultades relativas al sistema de alarma en diferentes ámbitos, incluyendo plantas de procesamiento petroquímico, plantas de bioprocesos, instalaciones de fabricación de acero, plantas de minería de carbón, plantas de

procesamiento de minerales de oro y cobre, el transporte marítimo, ferroviario y aéreo, la industria de telecomunicaciones, el control de supervisión de la red eléctrica y el dominio de la medicina.

En operación normal y transitorios menores, los sistemas de alarma generalmente funcionan bien. En grandes transitorios y situaciones accidentales, la avalancha de alarmas o cascada de alarmas, que se produce simultáneamente, y que el operador tiene que identificar, asimilar y tomar acciones (responder), conduciendo a sobrecarga cognitiva, es comúnmente reconocida en la literatura como un área problemática que debe abordarse (entre otros, Berg et al., 2011; Boring y Persensky, 2012; Bransby y Jenkinson, 1997, 1998b; Burnell y Dicken, 1997; Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain, 2008; Chang et al., 1999; Davey et al., 1993; EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Farbrot et al., 2000; Fink, 1990; Fujita et al., 1988; IAEA, 2001; J. T. Kim et al., 2001; Kinkade y Anderson, 1984; Koene y Vedam, 2000; Kondaveeti et al., 2012; Kortland y Kragt, 1978; Kragt y Bonten, 1983; Laberge et al., 2014; Larsson et al., 2006; S. J. Lee y Seong, 2014; Lees, 1983; Li et al., 2011; Marshall y Baker, 1994; Mattiasson, 1999; Mikkelsen et al., 2011; O'Brien y Woll, 2004; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara et al., 2009; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Rothenberg, 2009a; Seminara et al., 1979, 1980; Sørenssen et al., 2002; Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 2000; Stanton, Both y Stammers, 1992; Traub y Hudson, 2007; Woods et al., 1987; Yang y Chang, 1991).

Además, la detección de fallos disminuye a medida que aumenta la carga cognitiva, por lo que el operador encontrará dificultades para manejar la avalancha de alarmas asociadas a las anomalías del proceso (O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Estos desafíos hacen que el sistema de alarma sea difícil de usar durante las anomalías significativas de la planta, cuando en realidad más se necesita.

Consiguientemente, la inflación de alarmas puede llevar al operador a perder confianza en el sistema (Best et al., 1985; Kinkade y Anderson, 1984; Kortlandt y Kragt, 1978; Kragt y Bonten, 1983; Lees, 1983; Li et al., 2011; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, et al., 2000; Seminara et al., 1976, 1979, 1980; Stanton, 1992; Stanton et al., 2000).

Ante una avalancha de alarmas, los operadores a veces desatienden o ignoran las alarmas (Bliss, Dunn y Fuller, 1995; EPRI, 2003e, 2004a, 2005; exida, 2009; Fickelscherer y Chester, 2013; Fink, 1990; HSE, 2001; ISA, 2009; Landry y Divvela, 2007; Lees, 1983; Li et al., 2011; Mikkelsen et al., 2011; Mumaw et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a; Parasuraman y Riley, 1997; Parasuraman y Wickens, 2008; Seminara et al., 1976; Siemens, 2010; Sørenssen et al., 2002; Sorkin 1988, 1989; Stanton, 1994a, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998; Stanton et al., 1992; Vicente, 2007; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 2001; Vicente, Mumaw y Roth, 2004; Wickens et al., 2009; Woods, 1995; Xiao et al., 2004), o incluso en algunas ocasiones desactivan o deshabilitan algunas alarmas (Connelly, 1997; De Keyser y Nyssen, 2001; Edworthy y Adams, 1996; Edworthy y Hellier, 2005, 2006; Haas y Edworthy, 1996; HSE, 1994; Lees, 1983; Matthews et al., 2009; Mumaw et al., 2000; Parasuraman y Riley, 1997; Parasuraman y Wickens, 2008; Roth et al., 1997; Seminara et al., 1976, 1980; Sorkin, 1988, 1989; Vicente, 2007; Vicente et al., 1997, 2001; Xiao et al., 2003, 2004).

Como conclusión, la existencia de sistemas de alarma deficientes durante anomalías en la planta es bien conocida, se han dedicado numerosos esfuerzos para resolverlo, pero el problema persiste, a pesar de los muchos intentos diferentes para abordarlo.

6 INCIDENTS AND ACCIDENTS IN COMPLEX SYSTEMS RELATED WITH ALARM SYSTEM

Alarm system deficiencies and problems have contributed in many incidents and accidents in the industry. Incidents have highlighted the relation between poor alarm management and process safety. The operator response to alarms is crucial in preventing a process upset from escalating into a more serious event (Stauffer & Hatch, 2009). A selection of incidents where the alarm system has played an important role is given in this section.

6.1 INTRODUCTION

Accident analysis approaches are extensively described in the literature, Qureshi (2007, 2008) and Qureshi, Ashraf, and Amer (2007) make a review of the accident analysis and modeling approaches (safety models), and classify them into: sequential accident models (Domino theory proposed by Heinrich), epidemiological accident models (Swiss cheese model of accident causation of Reason (1990, 1997)), complex sociotechnical systems (Perrow), systemic accident models (Rasmussen's hierarchical socio-technical framework, Systems-Theoretic Accident Model and Processes –STAMP– of Leveson, Cognitive Reliability and Error Analysis Method –CREAM– of Hollnagel, Functional Resonance Accident Model –FRAM– of Hollnagel), organizational analysis of accident causation (Hopkins, Vaughn, normal accident theory of Perrow, and high reliability organization theory), as well as the application of formal methods to accident modeling.

Patterson (2009) reviews the human error taxonomies to understand the causes of human error: the cognitive perspective (Rasmussen, Wickens), the ergonomic perspective (SHEL model of Edwards), the behavioral perspective (Peterson), the epidemiological perspective (Suchman), and the psychosocial perspective (Helmreich and Foushee). She argues that newer models represent systems or organizational approach to accident investigation, and tend to look at accidents as a result of a combination of causes that interact with each other, considering the system as a whole.

The model on accident causation of Professor James Reason, known as the *Swiss Cheese Model*, is heavily used in safety critical domains. A revision of Reason's model accident causation can be found in Reason, Hollnagel, and Paries (2006). In the Reason's model, multiple contributors (the holes in cheese slices) must be aligned for any adverse events to occur. Barriers in a system (the slices themselves) are intended to prevent errors that result in these adverse events. A compilation of advantages and disadvantages of the Swiss Cheese Model was done to gain insight into the potential and limitations of the model for Air Traffic Management (ATM) application (Reason et al., 2006).

On the other hand, Kletz (2001) analyzes several accidents for how we can learn from the accidents, and thus be better able to prevent them occurring again. Kletz (2001) finds more helpful to list the chain of events leading up to an accident than to use an accident model. To quote Kletz:

Personally I have not found such models useful. I find that time may be spent struggling to fit the data into the framework and that this distracts from the free-ranging thinking required to uncover the less obvious ways of preventing the accident. A brainstorming approach is needed. I do give in Appendix 1 a list of questions that may help some people to look below the surface but they are in no sense a model. Use models by all means if you find them useful but do not become a slave to them. Disregard them if you find that they are not helping you.

However, although I do not find a general model useful, I do find it helpful to list the chain of events leading up to an accident and these chains are shown for each accident that is discussed in detail (Kletz, 2001, p. 7).

In the recent years, there has been an increase in the number of accidents involving chemical and industrial plants (Takeda, Aimi, Hamaguchi, Noda, & Kimura, 2011). In large complex systems, accidents gradually develop over a period of time through a conjunction of several small failures, both machine and human (Perrow, 1984, as cited in Qureshi, 2007; Reason, 1990). It can be seen from analyses of accidents, that it is quite unusual for an accident to occur as the result of a single action (e.g., one error) (Noyes, 2001), so the accidents have multiple causal factors. Reason et al. (2006) state that the accidents in complex systems occur through the concatenation of multiple factors, where each may be necessary but where they are only jointly sufficient to produce the accident. All complex systems contain such potentially multi-causal conditions, but only rarely do they arise, thereby creating a possible trajectory for an accident. Often these vulnerabilities are latent (i.e., already present when the accident occurred).

Industrial accident investigations have identified that the inadequate alarm system performance has contributed to a significant number of industrial incidents and serious accidents. Furthermore, the incidents and accidents demonstrate what can happen when an alarm system and operator response fail as a layer of protection in a hazardous process (Stauffer & Hatch, 2009).

Often either process plant operators are kept unaware of abnormal conditions due to the failure of appropriate alarms to activate or they did not activate with sufficient time to permit the operator to react effectively, and also the avalanche of alarms during upsets, prevents the operator from identifying which alarms are important and which are not (Rothenberg, 2009a). The alarm flood (alarm avalanche) may originate that the operators overwhelmed, and difficult the understanding of the real problem for some time. The information may not be readily available in a convenient and understandable form. Beyond, a poorly designed alarm may cause the event of a small incident turning into a more serious incident, which led to major accident. Takeda et al. (2011) provide the example of the Three Mile Island accident as a minor event that turns into major accident resulted from operator's confusion due to an alarm flood.

Bransby and Jenkinson (1998a, p. 12) also state

Missed alarm incidents are random and unpredictable. If operators at a plant state that sometimes they accept alarms without fully investigating them –and this was found at every plant visited– then there is the real possibility of this contributing to a major incident. The fact that a plant has not to date had a major incident does not mean that it will not have one in the future.

There is evidence that large numbers of smaller and less obvious difficulties with alarm systems can have a significant financial impact (Andow, 1997; Bransby, 2001; Bransby & Jenkinson, 1998a). Andow (1997) describes a program for ASM Consortium, in petrochemical industry, with the objective of improving industrial practices, such that there is a substantial reduction in the annual cost of abnormal situations. The abnormal situations cover a wide spectrum of events, ranging from major fires, explosions and environmental incidents to quality problems and production limitations. ASM Consortium estimated losses of around \$10Bn per year from abnormal situations. Incidents occur frequently with typical costs ranging from \$100K to well in excess of \$1M per year, for example, one

plant had over 240 shutdowns per year at a total cost of \$8M, with many of these shutdowns being preventable. Refineries, on average, suffer a major incident once every three years costing on average \$80M. One insurance company showed that the industry was claiming over \$2.2Bn annually due to equipment damage (Andow, 1997). In addition to financial losses, personnel injuries or fatalities can be associated with the more serious incidents and accidents.

In the following, some case studies of incident and accident in which the alarm system was one of the major influencing factors –the alarm system failures were not the only contributors, as usually several factors came together to create a causal chain– are described:

- Three Mile Island Unit 2 Nuclear Power Plant (NPP), Pennsylvania, United States of America.
- Offshore Platform Piper Alpha, North Sea, United Kingdom.
- Texaco Milford Haven Refinery, United Kingdom.
- Esso Longford Gas Plant, Victoria, Australia.
- BP Texas City Refinery, United States of America.
- Spanair Flight JK 5022, Madrid, Spain.

6.2 THREE MILE ISLAND UNIT 2 NUCLEAR POWER PLANT, UNITED STATES OF AMERICA

The accident at the Three Mile Island Unit 2 (TMI-2) NPP, Pennsylvania, March 28, 1979, was the most serious in U.S. commercial NPP operating history. No injuries or deaths happened and no adverse radiological health effects from the TMI-2 accident (i.e., studies found that the radiation releases during the accident were minimal, below any levels that have been associated with health effects from radiation exposure). According to the World Nuclear Association (WAN)³¹, the cleanup of the damaged nuclear reactor system at TMI-2 took nearly 12 years and cost approximately US\$973 million (WAN, 2001).

The TMI-2 accident is classified in the International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) (IAEA, 2009)³² as an accident with wider consequences in the level 5.

The summary of the events is based on descriptions provided by U.S. NRC (2009) and WAN (2001). The accident began about 4:00 a.m., when the reactor was operating at 97% power, and the plant experienced a failure in the secondary cooling circuit (the non-nuclear section of the plant). The main feedwater pumps stopped running, which prevented the steam generators from removing heat, i.e., the temperature in the primary coolant rose. First the turbine and second the reactor were automatically shutdown. Immediately, the pressure in the primary system began to increase. For reducing the pressure, the pilot-operated relief valve on the reactor cooling system opened. The valve should have closed, when the pressure decreased by a certain amount, but the relief valve failed to close. Signals available to the operators failed to show that the valve was still open. As a result,

³¹ The World Nuclear Association is the international organization that promotes nuclear energy and supports many companies that comprise the global nuclear industry.

³² The INES scale is a worldwide tool for communicating to the public, in a consistent way, the safety significance of nuclear and radiological events. Events are classified on the scale at seven levels: levels 1-3 are called incidents, and levels 4-7 are accidents. The scale is designed so that the severity of an event is about ten times greater for each increase in level on the scale. Events without safety significance are called deviations and are classified below scale (Level 0).

cooling water poured out of the stuck-open valve and caused the core of the reactor to overheat. As coolant flowed from the core through the pressurizer, the instruments available to reactor operator provided confusing information. There was no instrument that showed the level of coolant in the core. Instead, the operators judged the level of water in the core by the level in the pressurizer, and since it was high, they assumed that the core was properly covered with coolant. As a result, alarms rang and lights flashed, the operators did not realize that the plant was experiencing a loss-of-coolant accident (LOCA). The operators took actions that made conditions worse by reducing the flow of coolant through the core. Because adequate cooling was not available, the nuclear fuel overheated to the point at which the zirconium cladding (the long metal tubes which hold the nuclear fuel pellets) ruptured and the fuel pellets began to melt. Later, it was found that about one-half of the core melted during the early stages of the accident. The core suffered severe damage as a result.

The partial meltdown of the TMI-2 reactor core accident was caused by a combination of design-related deficiencies, component failures (equipment malfunctions) and personnel error. WAN (2001, Three Mile Island Accident, para. 6) stated that “the operators were unable to diagnose or respond properly to the unplanned automatic shutdown of the reactor. Deficient control room instrumentation and inadequate emergency response training proved to be root causes of the accident.” Health and Safety Executive (HSE, 2005, p. 113) indicates, between the contributing factors, that “the operators failed to diagnose a stuck open valve due to poor design of control panel, distraction of 100 alarms activating, inadequate operator training. Maintenance failures had occurred before but no steps had been taken to prevent them recurring.”

Several major investigations focused on the TMI accident, being two of the most important well-known the President’s Commission on the accident at Three Mile Island (referred as Kemeny Report, elaborated by Kemeny et al., 1979) and the Nuclear Regulatory Commission’s Special Inquiry Group (known as Rogovin Report, elaborated by Rogovin & Frampton, 1980). The conclusions of the two investigations are similar in many major areas. Investigations into the accident of both Commissions concluded that the continual sounding of the auditory alarms and the flashing of the annunciator windows during the accident were distracting and made the diagnosis of the accident more difficult (Rankin et al., 1983). The TMI annunciator system was of little use to the operators during the first 150 minutes of the accident (Rankin et al., 1983).

In the investigation of the accident, some statements related with the alarm system of the Kemeny Report (1979) were:

- The control panel is huge, with hundreds of alarms, and there are some key indicators placed in locations where the operators cannot see them. There is little evidence of the impact of modern information technology within the control room. In spite of this, this control room might be adequate for the normal operation of nuclear power plants.

However, it is seriously deficient under accident conditions. During the first few minutes of the accident, more than 100 alarms went off, and there was no system for suppressing the unimportant signals so that operators could concentrate on the significant alarms. Information was not presented in a clear and sufficiently understandable form; for example, although the pressure and temperature within the reactor coolant system were shown, there was no direct indication that the combination of pressure and temperature meant that the cooling water was turning into steam. Overall, little attention had been paid to the interaction between human beings and machines under the rapidly changing and confusing circumstances

of an accident. Perhaps these design failures were due to a concentration on the large-break accidents –which do not allow time for significant operator action– and the design ignored the needs of operators during a slowly developing small-break (TMI-type) accident. While some of us may favor a complete modernization of control rooms, we are all agreed that a relatively few and not very expensive improvements in the control room could have significantly facilitated the management of the accident (Kemeny Report, 1979, p. 11).

- The control room was not adequately designed with the management of an accident in mind...
 - b. The information was presented in a manner which could confuse operators:
 - (i) Over 100 alarms went off in the early stages of the accident with no way of suppressing the unimportant ones and identifying the important ones. The danger of having too many alarms was recognized by Burns and Roe during the design stage, but the problem was never resolved.
 - (ii) The arrangement of controls and indicators was not well thought out. Some key indicators relevant to the accident were on the back of the control panel.
 - (iii) Several instruments went off-scale during the course of the accident, depriving the operators of highly significant diagnostic information. These instruments were not designed to follow the course of an accident.
 - (iv) The computer printer registering alarms was running more than 2-k hours behind the events and at one point jammed, thereby losing valuable information (Kemeny Report, 1979, pp. 29-30).
- Frederick and Faust were in the control room when the first alarm sounded, followed by a cascade of alarms that numbered 100 within minutes. The operators reacted quickly as trained to counter the turbine trip and reactor scram. Later Faust would recall for the Commission his reaction to the incessant alarms: “*I would have liked to have thrown away the alarm panel. It wasn’t giving us any useful information [emphasis added.]*” (Kemeny Report, 1979, p. 91, p. 93)³³.

In the investigation of the accident, the Rogovin Report (1980) quotes:

- On the morning of the accident, the alarms were of little use due to the number that were flashing and their almost random location. Instruments important to the accident, though they may have appeared to be of secondary importance to the designers, were located on back panels or consoles. Control room design played more than a minor role in contributing to the accident at Three Mile Island. Important alarms that might have told operators the pressurizer relief valve was stuck open, even though the control panel light showed it was closed, were the alarms keyed to temperature and pressure in the reactor coolant drain tank, into which hot water from the stuck-open valve was pouring for over 2 hours after the accident started. However, these alarms are on a panel remote from the central console that faces away from the operator! (Rogovin Report, 1980, p. 123).
- When the alarms for these indicators went off, the alarm lights could not be seen from the main console or main panels. An audible alarm went off but the audible signal is the same for all alarms so there was no reason for operators to single out the reactor coolant drain tank

³³ Comment by one operator at the TMI-2 NPP to the official inquiry following the TMI-2 accident (Kemeny et al., 1979).

alarms. And pushing the single button on the central console that “acknowledges” alarms caused the drain tank alarm to stop buzzing and the annunciator light to stop flashing. Without up-to-date computer printout, it is then impossible to tell when the alarm came on. During the accident the computer kept running behind in printing alarms, and operators “dumped” the computer memory several times to get back up to date.

Since the accident, operators have taken matters into their own hands. Affixed to the back wall of the control room is a large, round, convex rearview mirror-like those used in stores to watch for shoplifters-so that operators can see when lights are flashing on this backward-facing console.

In other respects, control room design also detracted from the operators’ ability to diagnose the accident. A number of the operators told us that the constant buzzing of the audible alarm system and the flashing of alarm lights was distracting at important times during the accident and made it more difficult to try to identify the true causes of the problems they were encountering. One of the operators on duty in the early hours of March 28 had written his management nearly a year earlier: *The alarm system in the control room is so poorly designed that it contributes little in the analysis of a casualty. The other operators and myself have several suggestions on how to improve our alarm system –perhaps we can discuss them sometime– preferably before the system as it is causes severe problems* [emphasis added] (Rogovin Report, 1980, p. 125).

- Any list of instrumentation problems that occurred during the accident would have to include at least the following (Rogovin Report, 1980, p. 126):
 - No visual alarm signaled that the emergency feedwater system was completely blocked off. This was not discovered for some 8 minutes into the accident, apparently because poor panel layout makes systems misalignment difficult to spot, and because a paper tag hanging from a handle on the control panel obscured an indicator light that would have shown the operators the position of one of the block valves shutting out this system. In newer plants, NRC requires an alarm that would have signaled this problem.
 - Soon after the accident began, the read-out and display computer got so far behind in printing out alarms that operators had to “dump” its memory in order to get up to date. Information about events and trends that might have helped them diagnose the accident was consequently lost.

Marshall and Baker (1994) consider that an increased concern over the design and operation of computer-based alarm systems was raised by the TMI-2 incident. Then nuclear power station control room operators were overwhelmed by the sheer number of alarms and, in fact, this was cited as the main reason why operators overlooked crucial alarms.

In a similar argumentation line, Rothenberg (2009a, pp. 27-28) points out that the alarm management issues relating to TMI-2 presaged most of the actual approach to alarm management:

- “Alarms are not applied properly due to a misunderstanding of the purpose of alarms and a failure to appreciate the scale of using them without careful consideration.”
- “The use of alarms is not sufficiently well understood. One must measure relevant data, infer performance (metrics), know what to do in the event of alarm activation, and know how to build alarms.”

- “Alarm design reaches deep into the existing infrastructure: alarms must be coordinated with plant design and culture.”
- “Alarm systems can really work –they were ineffectual here, but a good design could have made a meaningful difference.”
- “Alarm redesign is not simply an add-on –appropriate lead time is needed to arrive at a new working alarm system.”

As Kirwan (2001, p. 100) states “it was a fundamental shock to those inside the industry, that despite the extensive procedures and work systems and safety analysis, such an accident could actually happen.” The TMI-2 accident brought about sweeping changes involving emergency response planning, reactor operator training, human factors engineering, radiation protection, and many other areas of NPP operations. It also caused the U.S. NRC to tighten and heighten its regulatory oversight, with the effect of enhancing safety. The TMI-2 accident also led to the establishment of the Institute of Nuclear Power Operations (INPO) in 1979 and National Academy for Nuclear Training in 1985. In 1983, the U.S. NRC staff developed their first human factors plan as NUREG-0985 (NRC, 1983).

6.3 OFFSHORE PLATFORM PIPER ALPHA, NORTH SEA, UNITED KINGDOM

A major explosion and fire occurred on the offshore oil production platform Piper Alpha in the North Sea, which led to the destruction of the platform, July 6, 1988. A routine maintenance procedure of a backup propane condensate pump could not be completed and the rest of the work was left until the next day. The tube was sealed with a plate. Later in the evening, during the next work shift, the primary condensate pump failed. The shift was not aware that an important part of the machine had been removed and decided to start the backup pump. Gas products escaped from the hole left by the valve. Gas audibly leaked out at high pressure, ignited and exploded, blowing through the firewalls. The fire spread through the damaged firewalls, destroyed some oil lines and soon large quantities of stored oil were burning out of control. The automatic deluge system, which was designed to spray water on the fire, was never activated because it had been turned off. The accident caused one hundred and sixty-seven deaths.

Dickety (2011), from HSE, indicates that a breakdown in communication at shift handover and a failure of the *permit-to-work system* –which led to unsafe practices such as the re-commissioning of equipment still under maintenance– were identified as contributory factors. The Cullen report on Piper Alpha was also highly critical of the safety management system of the owners of the platform. “In addition, the incident highlighted the deficiencies of design guidelines and practices, the failure to adjust to new conditions and changes, issues with risk management, maintenance and inspection” (Det Norske Veritas (DNV), 2011, p. 18).

Paté-Cornell (1993) carried out a detailed postmortem analysis of the accident, explaining the technical and organizational factors involved. Most of the errors were rooted in the organization (its structure, procedures and culture). The organizational factors include flaws in the design guidelines and design practices, misguided priorities in the management of the tradeoff between productivity and safety, mistakes in the management of the personnel on board, and deficiencies in inspection and maintenance operations. In Paté-Cornell (1993) analysis, the issues related with false alarms were:

- Prior to the initial explosion, gas alarms were received in the main control room; but because of the display of the signals’ origins in the detector module rack, the operator did not check

where they came from. High gas alarms were received shortly after, but it had been determined earlier that the gas detection system was issuing false alerts (Paté-Cornell, 1993, p. 221).

- There were simple cases of deficiencies in the design of emergency equipment which did not work when needed: a warning system for gas leaks that produced too many false alarms and relied on readouts in the control room that proved difficult in times of crisis because of poor choice of layout, display, and color coding; or equipment such as life rafts that are not used in normal time and could not be inflated when needed (Paté-Cornell, 1993, p. 225).

6.4 TEXACO MILFORD HAVEN REFINERY, UNITED KINGDOM

A severe electrical storm caused plant disturbances and an explosion occurred five hours later, July 24, 1994. The electrical storm caused plant disturbances that affected, between others, the fluidized catalytic cracking unit. The explosion was caused by flammable hydrocarbon liquid being continuously pumped into a process vessel that, due to a valve malfunction, had its outlet closed. The only means of escape for this hydrocarbon, once the vessel was full, was through the pressure relief system and then to the flare line. The flare system was not designed to cope with this excursion from normal operation and due to liquid breakthrough at the fluidized catalytic cracking unit flare knock out drum, a failure occurred in the outlet pipe. A mixture of hydrocarbon liquid and vapor was released. This caused a major hydrocarbon fire at the flare drum outlet itself and secondary fires. Twenty-six people were injured, and caused damage of around £48 million and significant production loss (HSE, 2000).

Some of the key factors that emerged from the HSE investigation were (HSE, 2000; Wilkinson, 2007):

- There were too many alarms (alarm floods) and they were poorly prioritized (87% of the 2040 alarms displayed as high priority, despite many being informative only). Alarms were presented faster than they could be responded to. In the last 11 minutes before the explosion, the two operators had to recognize, acknowledge, and act on 275 alarms. Also safety critical alarms were not distinguished, as the majority of the alarms were assigned the same high priority. The excessive number of alarms in emergency situation reduced the effectiveness of operator response.
- The control room displays did not help the operators to understand what was happening, and the control panel graphics did not provide necessary process overview to help the diagnosis.
- There had been inadequate training for dealing with a stressful and sustained plant upset.

In addition, Bransby (1998a) points that some alarm records were lost, and because of the overload of alarms, operators cancelled them without necessarily appreciating what they meant.

In the investigation of the accident of the HSE (as cited in Simpson, Tunley, & Burton, 2003, p. 28), some statements related with the alarm system were:

- “During the incident, alarms were being presented to operators at the rate of one every two to three seconds.”
- “Warnings of the developing problem were lost in the plethora of instrument alarms triggered in the control room, many of which were unnecessary and registering with increasing frequency, so operators were unable to appreciate what was actually happening.”

- “The high level alarm for the flare drum was activated. There is no evidence that it was seen... A number of other critical alarms (not directly related to the incident) also appear to have been missed among the many equal status alarms.”

Other statements of the investigation report of HSE (as cited in Farbrot et al., 2000) about the alarm system were:

- “Alarms: Too many poorly categorized alarms overwhelmed the operators as the process upset develop.” (Farbrot et al., 2000, problems in existing alarm systems, para. 3).
- In the system as it was configured on the day of the explosion, the chances of operators restoring control by manual intervention decreased the longer the upset condition persisted. This was because they became progressively overloaded with an increasing barrage of alarms (Farbrot et al., 2000, problems in existing alarm systems, para. 5).

The lessons of the Texaco accident for HSE indicate that the alarm system has to be set in Safety Management System (SMS) context (Wilkinson, 2007). The SMS failures at Texaco included: plant modification procedure: modification of the plant had been carried out without an assessment of the potential consequences; instrument maintenance system: a control valve being shut when the control system indicated it was open; operator training/competence; lack of clear guidance on managing unplanned events and when to shutdown; as well as lack of clear authority to initiate shutdown: attempts to keep the unit running, when it should have been stop (Wilkinson, 2007). According to Bransby (1998a), a key lesson is that alarm systems require increased attention, and in addition, plant should be designed so that ultimate safety does not rely on control system alarms. Ultimate plant safety must not depend on operator response to an alarm (Wilkinson, 2007).

The main recommendations of the investigation report about the alarm system were (as cited in Farbrot et al., 2000, problems in existing alarm systems, para. 12):

The use and configuration of alarms should be such that: safety critical alarms, including those for flare systems, are distinguishable from other operational alarms; alarms are limited to the number that an operator can effectively monitor; and ultimate plant safety should not rely on operator response to a control system alarm.

Subsequent to the Texaco Milford Haven accident, the HSE commissioned a research project to investigate the current industry practice on the management of alarm systems, which is reported in Bransby and Jenkinson (1998a). It was found that the performance of alarm systems during plant upsets was poor on many process plants. The industry responded with the development of a guideline in alarm management, with the document EMMUA 191 (EMMUA, 1999).

6.5 ESSO LONGFORD GAS PLANT, AUSTRALIA

Esso Australia's gas plant at Longford, Victoria, suffered a major fire, and an explosion occurred September 25, 1998. A warm liquid system (the lean oil system) failed, allowing a metal heat exchanger to become intensely cold and therefore brittle. When operators tried to reintroduce warm lean oil, the vessel fractured and released a large quantity of gas which found an ignition source and exploded (Hopkins, 2003). Two men were killed and the gas supply was severed to the state of Victoria for two weeks.

A large number of factors contributed to the accident. Hopkins (2000) highlights failures in the critical hazard identification process, the safety management system audits, the incident reporting system, the alarm system, the inadequate oversight of the production process by senior staff due to organizational changes (i.e., no engineering support on site, as the engineers were relocated from the Longford site to head office in Melbourne in 1992), as well as the need for a safety case regime. Det Norske Veritas (DNV, 2011) states that after the accident, it was found that procedures were not effective, practices were developed informally, communication was poor at the management level and personnel lacked training, and also the plants had undergone modifications with no hazard assessment performed on the oldest plant.

The alarm system was one of the key aspects. The high level alarm on the condensate level in the absorber was ignored by operators. It was the failure to respond adequately to these alarms which led to the failure of the lean oil system, which in turn led to the cold temperature embrittlement of the heat exchanger (Hopkins, 2000). The Australian Royal Commission found that a contributing factor to the accident at the gas plant at Longford was that “operators had been routinely responding to hundreds of alarms per day” (Dawson & Brooks, 1999, as cited in Moulton, 2009, p. 119). The alarm problem was compound enormously by the number of alarms which the operators were expected to deal with –at least 300 or 400 a day–, and even in one process upset, 8500 alarms occurred within a 12-hour shift (Hopkins, 2000). As the alarms were very frequent, the operators quickly cancelled the audible alarm but the visual alarm lights were less obtrusive (Hopkins, 2000). It was clearly impossible for operators to monitor these alarms, respond to them, and they had become accustomed to operating the system in alarm for long periods. The operators had no way of distinguishing critical alarms from nuisance alarms; the lack of a system of priority for critical alarms explains why the operator failed to respond promptly or adequately to the activation of the alarm (Nimmo, 2008). DNV (2011) argues that operators were often working in *operation in alarm mode* (i.e., alarm overload). This led to a tolerance to the alarm conditions and the protective purpose of the system was lost. As Hopkins (2000, p. 6) highlights “the result was that operators became desensitized and the alarms consequently lost their capacity to serve as warnings.”

6.6 BP TEXAS CITY REFINERY, UNITED STATES OF AMERICA

After a maintenance outage, during the restarting of a hydrocarbon isomerization unit, a raffinate splitter tower was overfilled (i.e., operations personnel pumped flammable liquid hydrocarbons into the tower for over three hours without any liquid being removed), the three pressure relief valves opened for six minutes, resulting in a flammable liquid geyser from a blow-down stack that was not equipped with a flare. The release of flammables led to an explosion and fire at the third largest oil refinery in the United States, the BP Texas City Refinery, on March 23, 2005. Fifteen people were killed and one hundred and eighty injured (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), 2007). The financial loss exceeded \$1.5 billion (CSB, 2007).

Several factors contributed to the accident. The Final Investigation Report of the incident of the U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board³⁴ (CSB, 2007) between the causes considered human factors aspects (i.e., malfunctioning of instrumentation and alarms, antiquated and unsafe blow-down system design), inadequate methods to measure safety conditions (i.e., measured

³⁴ The CSB is an independent federal agency charged with investigating industrial chemical accidents.

safety performance through personal injury rate, rather than measuring process safety equipment performance), the overall safety culture and process safety management program had serious deficiencies, cost-cutting and failure to invest in the 1990s, and also operator training and staffing were downsized.

In the aftermath of the accident, BP followed the recommendation of the U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board and formed an independent safety review panel, chaired by former U.S. Secretary of State James Baker, to conduct a thorough review of the safety culture, safety management systems, and corporate safety oversight at its five U.S. refineries. The panel made ten recommendations to BP on process safety, and the report of that panel is often referred to as the Baker Report (J. A. Baker et al., 2007).

Key alarms and a level transmitter failed to operate properly, and to warn operators of unsafe and abnormal conditions within the high level in tower and the blow-down drum (CSB, 2007). Nimmo (2008) indicates that the plant had poor alarm management practices. Rothenberg (2009a), referring to the investigators summary, points to a high-level sensor alarm went off indicating rising levels of flammable hydrocarbons in the distillation tower, but a redundant alarm never went off on the day of the accident.

Some paragraphs of the Final Investigation Report of the incident of the U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB, 2007) highlighting critical lapses in alarm management were:

- Alarm tests:
 - “A functionality check of all alarms and instruments was also required prior to startup, but these checks were not completed.” (CSB, 2007, p. 48).
- Alarm activation:
 - “The tower level indicator showed that the tower level was declining when it was actually overfilling. The redundant high level alarm did not activate, and the tower was not equipped with any other level indications or automatic safety devices.” (CSB, 2007, p. 23).
 - “The high level alarm was triggered at 3:09 a.m. The redundant hardwired high level alarm never sounded.” (CSB, 2007, p. 50).
 - The Board Operator’s belief that the tower level was accurate was reinforced by the redundant high level alarm’s failure to activate. This alarm provided a redundant high level indication should the level transmitter malfunction. However, this alarm’s set-point was not known to operations personnel or provided in the procedure, control data, or training materials. The lack of a set-point at which the alarm would sound made recognizing the failure of the alarm less apparent. And because the separate alarm did not sound, the Board Operator believed this confirmed the fact that the level had actually dropped in the tower as liquid raffinate left the tower and circulated to the other unit equipment (CSB, 2007, p. 82).
- Alarm set-points:
 - “Tower pressure alarm set-points were frequently exceeded, yet the procedure did not address all the reasons this might happen and the steps operators should take in response.” (CSB, 2007, p. 73).
 - The tower’s high level alarm set-point was exceeded 65 times during the last 19 startups, with more than 50 hours of operating time with the high level alarm

activated. In contrast, the low level alarm was triggered nine times, and the column operated in low alarm for slightly more than five hours during the 19 startups (CSB, 2007, pp. 74-75).

6.7 SPANAIR FLIGHT JK 5022, SPAIN

The Spanair Flight JK 5022, from Madrid Barajas Airport to Gran Canary Airport, crashed just after takeoff from runway 36L of Barajas, August 20, 2008. The aircraft, a McDonnell Douglas DC-9-82 (MD-82), was destroyed as a result of impact with the ground and the subsequent fire. Of the occupants, one hundred and fifty-four were killed, including all six crew members, and eighteen were seriously injured.

The Civil Aviation Accident and Incident Investigation Commission (CIAIAC) investigated and reported the accident (*Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil* (CIAIAC), 2011). The cause of the accident was that the crew lost control of the aircraft as a result of a stall immediately after takeoff, because of an improper airplane configuration –involving the non-deployment of the flaps and slats– coupled with the absence of any warning of the incorrect takeoff configuration. The crew did not identify the stall warnings and did not correct the situation after takeoff. The crew momentarily retarded the engine power, increased the pitch angle and didn't correct the bank angle, brought about deterioration in the flight (stall) condition.

The crew did not detect the configuration error because they did not properly use the checklists to select and check the position of the flaps and slats during flight preparation. During the After Start checklist, the crew did not carry out the action to select the flaps/slats with the associated control lever, and also did not cross-check the position of the lever or the status of the flaps/slats indicator lights. In the Taxi checklist omitted to check the flaps/slats. During the Takeoff Imminent checklist, the position of the flaps/slats was not verified (CIAIAC, 2011).

The CIAIAC (2011, p. xviii) identified the following contributing factors:

- The absence of a takeoff configuration warning resulting from the failure of the TOWS³⁵ to operate, which thus did not warn the crew that the airplane's takeoff configuration was not appropriate. The reason for the failure of the TOWS to function could not be reliably established.
- Improper Crew Resource Management (CRM), which did not prevent the deviation from procedures in the presence of unscheduled interruptions to flight preparations.

As a result of the accident investigation, thirty-three safety recommendations were issued, intending to prevent accidents like this from happening again.

³⁵ TOWS state for Take-Off Warning System.

6.8 ADDITIONAL INCIDENTS AND ACCIDENTS WITH THE ALARM SYSTEM AS A CONTRIBUTING FACTOR

The alarm system has been one of the contributing factors in many other incidents and accidents in high technological complex systems. In the following some of them are briefly considered in relation to their alarm system.

Health and Safety Executive provides case studies for illustrating the importance of the alarm handling (HSE, 2004). In the Havkong incident at Braefoot Bay Terminal, Fife (UK), January 23, 1993, a liquid petroleum gas (LPG) tanker broke away from its moorings, at the Shell Expro Jetty at Braefoot Bay Terminal, during an unusually severe squall, while loading butane, in high winds. It drifted and twice lightly grounded before being maneuvered into a safe anchorage. No serious injuries or damage resulted from the incident. The investigation into the causes of the breakaway was jointly carried by the Marine Accident Investigation Branch and HSE (reported in HSE, 1994). “The incident illustrated a problem with the alarm systems in the marine terminal: operators routinely disabled the wind speed alarm –the reason being that, in gusty weather, the alarm would sound at the peak of a gust, and then reset when the wind speed dropped below the alarm activation limit. In addition, terminal staff did not know whether they should have sounded the site alarm during the emergency” (HSE, 1994, p. 1). Another case study refers to a vapor cloud that was released at a Philips chemical complex (polyethylene plant) in Pasadena, Texas, in 1989. The cloud ignited resulting in explosions and fires. The alarm siren was too quiet to be heard by all personnel (HSE, 1994).

Bransby and Jenkinson (1998a), in a management of alarm systems report for the HSE, also provide examples of descriptions of incidents which have been due to poor performance of the alarm systems, and have resulted in plant damage, lost production, or in environmental incidents.

The Union Carbide Bhopal Isocyanate Plant accident in India, in 1984, is considered to be the result of a combination of legal, technological, organizational, and human errors. A lack of an effective warning systems was one of the contributing factors –i.e., the alarm on the storage tank failed to signal the increase in temperature, the alarm at flare tower was non-operational, few alarms in critical locations that might have warned operators of abnormal conditions, alarms sounded so many times a week that no way to know what the siren signified, no alarm sounded a warning for the city residents and no evacuation plan was prepared– (Desborough, 2011).

The Herald of Free Enterprise was a roll-on roll-off passenger and freight ferry, departed from Zeebrugge (Belgium) to Dover (England), that flooded and subsequent capsized in 1987, resulted in the loss of one hundred and ninety-three lives. The immediate cause was the failure to close the outer and inner bow doors before leaving port. There was no information display or alarm to tell the captain if the bow doors were open. Following the accident, bow door warning lights were mandatory on roll-on roll-off ferries. The accident investigation report states: ‘Indicator lights should be fitted to all superstructure doors, such as passenger access, bunkering and storing doors. It is desirable that a dedicated door alarm panel be fitted, similar to that commonly used for watertight doors’ (Department of Transport, 1988, p. 36). An outcome of the accident investigation was the formation of the UK’s Marine Accident Investigation Branch (MAIB) in 1989.

In the Channel Tunnel (Eurotunnel) between France and UK, a truck fire on a Heavy Goods Vehicles, traveling from France to England, developed into an intense tunnel fire in 1996. The slow

response to (unconfirmed) fire alarms had an adverse effect on the management of the incident. New safety standards were set after the fire exposed shortcomings in procedures.

At Ladbroke Grove Junction in London, two trains crashed, a turbo of Thames Trains and a High Speed Train, in 1999. The driver of the Turbo overrode the Automatic Warning System and passed a signal at red for danger, traveling at 41 mph. Thirty-one people died as a result of the crash. In the rail sector, alarm management has been heavily influenced by the Cullen Enquiry recommendations (HSE, 2001) into the Ladbroke Grove accident. Prior to the Cullen Enquiry there were no formal requirements for the design of safety critical alarms within signaling control centers (Traub & Hudson, 2007).

The North America East Coast Blackout, in 2003, affected an estimated 50 million people had no electricity, and the failed alarm tools were a major factor in the blackout. Earlier in the afternoon the energy management system failed at the control center operated by First Energy, and after technicians rebooted the system, an undetected problem with the alarm processor persisted. The failure of the First Energy control computers and alarm system was not restored until after the blackout. The U.S.-Canada Power System Outage Task Force blackout investigation report narrates the sequence of events, presents the root causes, and provides recommendations (North American Electric Reliability Council, 2004).

In Buncefield Oil Storage depot (UK) vapor from thousands of gallons of petrol ignited causing an explosions and a large fire engulfed a high proportion of the site in December 2005. Over forty people were injured. Research is being carried out to understand the mechanism of the explosion. However, the investigation into the immediate and underlying causes of the incident has focused on the switch used in the ultimate high-level alarm system installed on the tank (Dickety, 2011). The automatic shutdown system failed, and the alarm system did not provide the visual and audible indications to the operators.

7 EL SISTEMA DE ALARMA EN LA CENTRAL NUCLEAR

La importancia del sistema de alarma de la sala de control de una central nuclear radica en que es la principal fuente que tienen los operadores para detectar las anomalías en la planta. Las primeras salas de control de las centrales nucleares se diseñaron en paneles con indicadores y controles empleando tecnología de cableado (*sistema de alarma convencional*). Con posterioridad, diversos proyectos de actualización y modernización de salas de control han dado lugar a salas de control híbridas, que disponen tanto de paneles con cableado como de componentes individuales, presentados en PVD (*sistema de alarma avanzado*), incorporando lógica de procesamiento de alarmas. Los diseños más recientes de sala de control avanzada proponen una tecnología totalmente integrada, que presenta todos los datos de la planta y los controles mediante pantallas computarizadas.

Brown et al. (2000), O'Hara y Brown (1991), O'Hara et al. (1995), O'Hara, Brown, et al. (1994), O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008), Persensky et al. (2010) y Vicente (1996) enfatizan que el papel del sistema de alarma en la sala de control puede ser diferente si trata de una sala convencional, híbrida o avanzada. Esto es debido, fundamentalmente, a que mientras que en las plantas convencionales el sistema de alarma ha sido diseñado como un sistema independiente, en cambio, las salas de control avanzadas disponen de características superiores para la presentación de información y para la integración de datos que asistan a los operadores (Brown et al., 2000; O'Hara y

Brown, 1991; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Vicente, 1996). Esta forma de presentación diferente podría sugerir que se debe esperar más de los sistemas de alarma avanzados en salas de control híbridas que de los sistemas de alarma en plantas avanzadas (Brown et al., 2000; O'Hara y Brown, 1991; Persensky et al., 2010). Sin embargo, no existe evidencia empírica que apoye la forma en que los sistemas híbridos influyen en el comportamiento del operador (Persensky et al., 2010).

7.1 PRESENTACIÓN DE ALARMAS EN LA SALA DE CONTROL

Las pantallas de alarma suelen tener tanto componentes audibles como visuales. Los componentes audibles se diseñan para alertar al usuario de la presencia de una alarma, indican un cambio de estado de la alarma. Los componentes visuales guían la atención a la alarma correspondiente, mediante el uso de técnicas como el parpadeo, y proporcionan información más detallada de la alarma: el mensaje de alarma.

O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) expresan las necesidades de investigación sobre qué información específica se precisa para que las alarmas cumplan las funciones de alarma y cómo debería ser presentada. Incluir muy poca información hace que el sistema de alarma resulte menos útil, ya que puede que no presente la indicación necesaria para analizar y entender correctamente el mensaje, en cambio, el exceso de información hace que sea complicado de usar (Larsson et al., 2006; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). El argumento de O'Hara, Higgins, Brown y Fink (2008) es que cuando se anuncian las alarmas, los operadores deben determinar si la señal representa un evento real o espurio. La baja probabilidad de sucesos anómalos importantes en las centrales nucleares y, por tanto, la baja expectativa, puede hacer difícil o lenta la aceptación del operador de ciertas alarmas. Después de verificar diversos indicadores consistentes, el operador tomará las medidas apropiadas. Es decir, las alarmas son una parte del sistema de información de la planta y los operadores utilizan la información de alarma en conjunto con otra información disponible para decidir la acción apropiada (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

7.1.1 Principales formas de presentar las alarmas en la sala de control

En la presentación de alarmas existen dos dimensiones fundamentales (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000): la dedicación espacial, si una alarma se presenta siempre en la misma ubicación física o en posición variable, y la permanencia del display, si una alarma está siempre visible o sólo cuando se encuentra en estado de alarma. Estas dos dimensiones distinguen tres tipos de displays (O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b): displays de alarmas espacialmente dedicados y continuamente visibles (SDCV o *Spatially Dedicated, Continuously Visible*), displays de alarmas temporales y alarmas integradas.

El display de alarmas espacialmente dedicado y continuamente visible proporciona la información en una localización permanente, fija, en la misma posición y siempre está visible, exista un estado de alarma o no, lo que implica un método de presentación en paralelo (O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). Esto es, una alarma permanente proporciona información de estado cuando no está activa, e información de retroalimentación al cambiar de un estado activo a inactivo (Kragt, 1983; Kragt y Bonton, 1983). Los sistemas de alarma convencionales son un ejemplo de esta forma de presentar las alarmas (O'Hara,

Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) en paneles de alarmas individuales o alarmas en ventanillas dentro del panel de control o de un panel trasero (Bransby y Jenkinson, 1998a). Cada ventana de alarma está etiquetada individualmente con el título de la alarma, y la ventanilla está encendida cuando la alarma está activa, se muestra la prioridad por un código de color (Bransby y Jenkinson, 1998a).

El display de alarmas temporales sólo muestra el mensaje de alarma cuando se encuentra en estado válido y, dependiendo del diseño, las alarmas temporales pueden aparecer o no en lugares espacialmente dedicados (O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000). Presentan la información en serie (O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). Por ejemplo, listas de mensajes de alarma en pantallas de visualización.

Las alarmas integradas presentan información de alarma como una parte integral de otros displays, por ejemplo, alarmas en los diagramas del proceso. Pueden mostrarse en una localización fija o variable, no constituyen displays permanentes (O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000).

Por otro lado, existen posibles combinaciones de estos métodos de mostrar la información (alarmas en ventanillas, alarmas en listas y alarmas incorporadas en los formatos del proceso), por ejemplo, emplear ventanillas de alarmas en pantallas PVD. Entre los diseños de sistemas de alarma híbridos en centrales nucleares se encuentra el sistema de C. N. Beznau (Suiza) que implementó el sistema de gestión de alarmas AWARE, consta de un sistema anunciador basado en ventanillas y de un sistema de alarma en pantallas de visualización (Carrera, Easter y Roth, 1996; Easter y Lot, 1992; Roth y O'Hara, 2002); en las unidades 1 y 2 de C. N. Temelin (República Checa) disponen de un sistema anunciador clásico y de alarmas en DCS (citado en Gordon y Andersson, 2007); en la unidad 2 de la central de Ringhals (Suecia) el sistema de presentación de alarma (denominado sistema APS), en pantallas de visualización de datos, emula un sistema anunciador de alarmas basado en ventanillas, con alarmas en grupos funcionales espacialmente dedicadas y, también, los operadores pueden seleccionar listas de alarmas (Fitch, 2002; Gordon y Andersson, 2007; Lang, 2009, 2010); y el sistema de alarma que están desarrollando para el reactor avanzado SMART (*System-Integrated Modular Advanced Reactor*) de Corea, que es un sistema digital en pantalla de visualización de datos, con displays espacialmente dedicados en ventanillas y listas de alarmas, empleando un método proactivo de reducción de alarmas (Jang, Seong, Keum, Park y Kim, 2008; Jang, Suh, Kim, Suh y Park, 2013).

7.1.2 Preferencia de los operadores sobre el formato de presentación de alarmas

Generalmente los operadores prefieren las alarmas en ventanillas convencionales, displays SDCV, que han mostrado ventajas de actuación en condiciones de alta densidad de alarmas y, además, proporcionan superioridad perceptiva para una detección rápida y realzan el reconocimiento de patrones (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e, 2005; Fink, Zarechnak, Williges y O'Brien, 1992; Kragt, 1984; Kragt y Bonten, 1983; Matsushita et al., 1988; Moum et al., 1998; MPR Associates, 1985, 1988; O'Hara, 1996; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara et al., 1994, 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Roth y O'Hara, 2002; Vicente, 1996). Esto es, en condiciones de elevada carga, los operadores suelen abandonar la lista de mensajes debido al tiempo y al esfuerzo necesario para procesar los mensajes (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002a).

7.1.3 **Formato de presentación recomendado de alarmas**

Para apoyar las diferentes funciones del sistema de alarma, suele emplearse combinaciones de diferentes formatos de presentación, existiendo ventajas y desventajas en cada uno de ellos (Bransby y Jenkinson, 1998a; Brown et al., 2000; Chang et al., 1999; Choi et al., 1996; EPRI, 2003e, 2005; Fink et al., 1992; O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Skraaning y Andresen, 1999), incluyendo pantallas espacialmente, pantallas de lista de mensajes y pantallas integradas de alarmas con otros formatos de pantalla. Como ilustración, O'Hara, Brown, et al. (2000) recomiendan la combinación de las tres formas de presentación de alarmas, en función de los roles a cubrir, descrito posteriormente en este documento, en el apartado 8.3, al resumir la investigación de U.S. NRC.

La presentación espacialmente dedicada y continuamente visible, recomendada por la aproximación de U.S. NRC (Brown et al., 2000; O'Hara, Brown, et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) para alarmas que requieran una respuesta a corto plazo, las alarmas más importantes para diagnosticar y para responder a las anomalías de la planta, y las alarmas más importantes para mantener la visión global de la planta y del estado de los sistemas. Esta forma de presentación de información se aconseja para las alarmas más importantes (EPRI, 2003e, 2005, 2006; NPD, 2001) o alarmas clave (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; Shaw, 1993), para alarmas críticas de seguridad (Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009), mientras que Vicente (1996) propone también que los sistemas de alarma deben incluir un formato de presentación paralelo espacialmente dedicado para apoyar la interpretación de un vistazo, mantener una visión general del estado de la planta y, considera posible, probablemente deseable, combinar en un único diseño un formato de presentación paralelo espacialmente dedicado con alarmas integradas en formatos del proceso.

7.2 **SISTEMA DE ALARMA CONVENCIONAL EN PANEL ANUNCIADOR**

En una sala de control de una planta de energía nuclear, el sistema de alarma consta, típicamente, de un número de anunciadores dispuestos en la parte superior de los paneles, encima de los controles y las pantallas, utilizados por el operador para responder a las condiciones de alarma. Los anunciadores de alarma tienen una larga tradición en la mayoría de los sectores industriales.

Un anunciador de alarma es un dispositivo que acepta entradas procedentes de sensores de campo, normalmente a través de contactos de relés, señala la presencia de condiciones anormales en el proceso, proporcionando una indicación visual, de tal manera que la iluminación de la pantalla se asocia, inmediata y únicamente, con una entrada específica y un aviso acústico (Dzwig, 2008; EEMUA, 1999; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). Cada anunciador contiene una serie de ventanillas iluminadas, que representan las condiciones de alarma dentro de la planta. Cada una de las ventanillas del panel de alarmas tiene grabado un mensaje, que indica al operador la naturaleza de la condición de alarma. Los anunciadores están generalmente agrupados por áreas de la planta y subgrupos de sistemas.

La tecnología basada en cableado ha sido diseñada con la arquitectura de *un único sensor y un único indicador* (una alarma), requiere que el operador mentalmente compare y combine datos de la planta, de bajo nivel, para entender el estado de la planta (Easter, 1991; Roth et al., 1992).

Los operadores suelen aceptar el sistema anunciador de una sala de control convencional por las siguientes razones:

- Visibilidad simultánea. Los anunciadores se agrupan físicamente y se organizan en paneles que pueden mostrar cientos de alarmas, visibles simultáneamente (Dzwig, 2008; Moum et al., 1998; Roth y O'Hara, 2002; Seminara y Eckert, 1980), en donde el operador tiene acceso inmediato, sin necesidad de buscar datos, a información del estado (Dicken, 1999a, 1999b; Seminara y Eckert, 1980). Los parámetros mostrados en las ventanas están relacionados, ya estén iluminadas o no, e indican al operador la situación de cada parámetro (Seminara y Eckert, 1980).
- Reconocimiento de patrones. El posicionamiento constante o fijo de cada alarma permite el reconocimiento instantáneo de patrones, basándose el operador en su conocimiento de la localización espacial o geográfica (Boring y Persensky, 2012; Brown et al., 2000; Choi et al., 1996; Dzwig, 2008; EPRI, 2003e, 2004a, 2005; Fink et al., 1992; Jervis, 1984; Kragt, 1984; Kragt y Bonten, 1983; Marshall y Baker, 1994; Matsushita et al., 1988; Moum et al., 1998; MPR Associates, 1985, 1988; O'Hara, 1996; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; O'Hara, Higgins y Kramer, 2000; Persensky et al., 2010; Roth y O'Hara, 2002; Seminara y Eckert, 1980; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 2000; Vicente, 1996). Por lo tanto, sin necesidad de leer el mensaje de la alarma. A través de la experiencia operativa y la formación, los operadores son capaces de reconocer patrones de señales en los paneles anunciadores (Bovell, Carter y Beck, 1997). El operador desarrolla una imagen mental al familiarizarse con la distribución de las alarmas (Choi et al., 1996). La posición fija y el patrón de ventanillas de alarma proporciona una ventaja para evaluar rápidamente el estado de la planta y reconocer el transitorio (Bovell, Carter y Beck, 1997; EPRI, 2004a).

La representación espacial de la alarma y la correspondencia física con los sistemas ha dado lugar a lo que los operadores describen como una característica emergente: una cualidad que no está presente en los anunciadores individuales, sino que surge por el patrón de ventanillas iluminadas durante los transitorios específicos o fallos del subsistema (Boring y Persensky, 2012; O'Hara, Higgins y Kramer, 2000). Además, los operadores pueden conocer parte de lo acontecido sin acudir a la atención focal (en el caso de las centrales nucleares, hasta mediados o finales de los ochenta, existían deficiencias en la legibilidad del texto de la alarma del anunciador, sin embargo, los operadores seleccionaban el patrón del suceso), en otras palabras, decidir si se justifica o no un cambio en la atención (Woods, 1995).

- Elevado brillo y visibilidad permanente de los indicadores de las lámparas, ya estén implementados con tecnología de semiconductores o con luz incandescente. A menudo es posible utilizar las pantallas en condiciones al aire libre, en donde las pantallas de visualización de datos son menos eficaces (Dzwig, 2008).
- Relación directa entre la condición de la anomalía y la alarma mostrada (Dzwig, 2008), siendo crucial para la monitorización de una alarma relacionada con la seguridad (IEC, 2000). Los límites de la función de seguridad, que cumple el anunciador, se determinan fácilmente y permiten una evaluación detallada de la fiabilidad.
- Las ventanillas anunciadoras tienden a presentar un buen diseño del sistema de alarma en operación al 100% de potencia, sólo se producen fallos de menor importancia, lo que genera escasas alarmas, resultando eficaces para alertar a los operadores sobre condiciones fuera de lo normal (Chériaux et al., 2010, 2011; EPRI, 2005, 2006), lo mismo sucede ante pequeñas

perturbaciones (Sørenssen et al., 2002). Los operadores pueden atender a un número limitado de indicaciones de alarma sin distraerse, interpretar el significado de las alarmas, recopilar información adicional, si es necesario, y tomar las acciones apropiadas (EPRI, 2005).

Entre las principales dificultades o desventajas de los sistemas de alarmas convencionales en paneles anunciadores se encuentran:

- La aplicación del criterio *un sensor - un indicador o una señal - una alarma* conlleva diversos problemas, como son la generación de numerosas alarmas durante transitorios (IAEA, 2001), diversas alarmas para un único fallo (J. T. Kim et al., 2001; S. J. Lee y Seong, 2014; Sørenssen et al., 2002; Stanton, 1992; Stanton et al., 1992), alarmas irrelevantes que no son sensibles al contexto (modo de operación de la planta) (IAEA, 2001) y el contenido de la información proviene de una sola fuente de alarma (IAEA, 2001).
- Falsas alarmas. Si el sistema de alarma se convierte en “ofensivo” a través de una sucesión de falsas alarmas, el operador tenderá a desactivar el elemento molesto del sistema y, por lo tanto, a dificultar la detección de anomalías posteriores más graves (Seminara et al., 1980).
- No se muestra toda la información necesaria para comprender la anomalía (Brown et al., 2000; EPRI, 2003a; Moum et al., 1998; O’Hara et al., 1998; O’Hara, Brown, et al., 2000; Saarni, Førdestrømmen, Meyer y Skjerve, 2001; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998; Stanton et al., 1992, 2000). Por ejemplo, la secuencia de anunciación, la fecha y el tiempo de ocurrencia, el punto de tarado y el valor, lo que puede ocasionar que no se detecten alarmas debido a la pérdida de información temporal (Stanton y Baber, 1995).
- La existencia de alarmas durante operación normal –en ocasiones son indicadores de estado, en otros casos las alarmas se activan y desactivan continuamente– puede dar lugar a un efecto de enmascaramiento de las alarmas anunciadas durante situaciones de anomalía y de emergencia, por lo que el operador podría no detectarlas, o hacerlo con posterioridad (Sørenssen et al., 2002). Se presentan al operador demasiadas alarmas que no son importantes (Henningesen y Kemmerer, 1993).
- Una menor flexibilidad en la presentación de las alarmas (EPRI, 2003a) y en facilitar la reducción de las alarmas (Henningesen y Kemmerer, 1993).
- Dificultad en el tiempo de sincronización de las distintas unidades, por lo que los datos históricos, posteriores al disparo, son difíciles de integrar con datos de otros sistemas (EPRI, 2003a).
- Dificultad para integrar información de alarma en las diferentes pantallas de alarma que los operadores utilizan (EPRI, 2003a).
- Chériaux et al. (2010, 2011) y EPRI (2006), basándose en la realimentación operativa, detectaron que se originan algunas deficiencias en otros modos de operación y durante transitorios, debido a sobrecarga de alarmas o a no disponer de filtros basados en el modo de planta.
- Capacidad limitada para introducir el procesamiento de las alarmas y reducir así la sobrecarga de alarmas durante anomalías (EPRI, 2003a).
- Puede resultar arduo detectar una nueva alarma si la atención del operador está centrada en otra parte del panel, o una vez detectada y aceptada la alarma, su estado se ve igual que cualquier otra alarma, no se muestra la secuencia de la información, dificultando especialmente la tarea de búsqueda ante un gran número de alarmas (Stanton et al., 1992, 2000).

- Los operadores reconocen y silencian las alarmas que se producen en el extremo opuesto del panel y luego pierden su seguimiento, retrasando la acción correctiva (Seminara et al., 1980). Las señales de alerta no deben ser disruptivas con las actividades en curso (Seminara et al., 1980). Los operadores no deben sentirse obligados a correr, para desactivar una alarma molesta, antes de que se detecte el problema (Seminara et al., 1980).
- Ubicar todas las alarmas en paneles puede originar problemas de sobrecarga de alarmas durante anomalías significativas del proceso (Chang et al., 1999; O'Hara, 1996; O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000). En grandes anomalías, se origina una avalancha de alarmas, las alarmas actúan principalmente como una distracción, aumentan la carga cuando los operadores dirigen su atención a reconocer las alarmas, silenciar los avisos audibles y revisar la información de alarma (EPRI, 2005).

7.3 SISTEMA DE ALARMA COMPUTARIZADO Y AVANZADO

El sistema de alarma computarizado permite un control más flexible y la optimización de las condiciones del proceso, al disponer de datos de mejor calidad (Stanton, 1992; Stanton et al., 2000). Proporciona, en principio, un amplio rango de opciones para adaptar el sistema a las capacidades humanas (Kortland y Kragt, 1978). Las aportaciones desde los factores humanos a los sistemas de alarmas convencionales de las centrales nucleares han llevado a desarrollar sistemas de alarma avanzados, en donde las alarmas dejan de procesarse en el marco de *un sensor - una alarma* (Brown et al., 2000; I. S. Kim y O'Hara, 1993; J. T. Kim et al., 1996, 2001; S. J. Lee y Seong, 2014; O'Hara, 1996; O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994).

No obstante, mientras que inicialmente los sistemas computarizados eran vistos como la panacea para el problema de las alarmas, generan nuevas dificultades a los operadores, debido al aumento de la complejidad del sistema, el suministro de información adicional y un mayor énfasis en la tarea de monitorización (Stanton, 1992; Stanton et al., 2000).

O'Hara et al. (1998), S. J. Lee y Seong (2014) y Reinartz (1993, citado en Stanton y Baber, 1995) sugieren que la introducción de nuevas tecnologías en la sala de control no siempre mejora la ejecución de la tarea, lo que Stanton et al. (1992) atribuyen a la maximización de la información suministrada al operador, sin la debida consideración de las limitaciones humanas. Aunque los nuevos sistemas pueden reducir posibles errores humanos, también pueden ocurrir nuevos tipos o incluso aumentar la posibilidad de determinados errores (EPRI, 2003e; S. J. Lee y Seong, 2014; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

Asimismo, no es necesario que un sistema de alarma emplee tecnología avanzada para ser eficaz (Connelly, 1997). La experiencia de campo indica que la mera informatización de los sistemas de alarma existentes –referido a incorporar idénticos mensajes de alarma, desde un medio paralelo y espacialmente dedicado, a una presentación en serie, que incluye generalmente listas de mensajes ordenadas cronológicamente– no ha corregido el problema de las alarmas y, en algunos casos, lo ha exacerbado (Danchak, 1980; Gilmore, 1985; Gilmore, Gertman y Blackman, 1989; Han et al., 2007; Lees, 1983; Potter y Woods, 1991; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 1992; Woods, 1995).

Un sistema de alarma debe utilizar varios mecanismos de procesamiento y de presentación de la información, debido a la diversidad de funciones del sistema de alarma (EPRI, 2006). No resulta fácil procesar y mostrar en una única pantalla o en una lista, las alarmas que se deben utilizar al mismo

tiempo para diagnosticar las causas, evaluar las consecuencias y guiar la respuesta del operador (EPRI, 2006). Para operar una planta, hay que definir una estrategia de gestión de las alarmas y del uso del sistema de alarma en la operación (EPRI, 2003a).

La característica definitoria de un sistema avanzado es la capacidad para ayudar al operador por medio del procesamiento de datos de alarma, demandando una menor cantidad de recursos mentales, previamente a su presentación; esta tecnología puede proporcionar un medio de corregir muchas de las deficiencias conocidas de los sistemas de alarma, reducir la cantidad de alarmas y, además, se puede aplicar a nuevas plantas así como a procesos de modernización de las instalaciones (Boring y Persensky, 2012; Chang et al., 1999; Choi et al., 1996; Hollo, 1977; I. S. Kim y O'Hara, 1993; O'Hara, 1996; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994; Persensky et al., 2010). Puesto que los sistemas avanzados disponen de la capacidad de filtrar, de suprimir y de priorizar las alarmas, facilitan a los operadores distinguir la información más relevante de la menos relevante. Lo que es lo mismo, permiten que los operadores se concentren en las alarmas más importantes (Bullemer et al., 2011; EPRI, 2003e, 2004a, 2006; O'Hara, Brown, et al., 2000; S. J. Lee y Seong, 2014).

Existen ventajas y desventajas en el filtrado, la supresión y la priorización de las alarmas, como se expone a continuación (Brown et al., 2000; O'Hara, 1996; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Brown, et al., 2000). En primer lugar, el filtrado elimina la posibilidad de que alarmas sin importancia distraigan a los operadores. Sin embargo, el diseñador puede eliminar información que se emplea para otros fines; además, debe estar seguro de la validación del método de procesamiento para todas las condiciones de la planta. En segundo lugar, la supresión cuenta con el beneficio de filtrar, mediante la eliminación de alarmas potencialmente distractoras, pero existen dos inconvenientes en la supresión: 1) los diseñadores no pueden anticipar todas las posibles anomalías de la planta, por lo que algunas alarmas suprimidas pueden ser importantes para la toma de decisiones de los operadores en ciertos contextos; 2) se impone al operador una carga de trabajo adicional para recuperar las alarmas suprimidas, accesibles desde pantallas auxiliares. En tercer lugar, la priorización no oculta ninguna información a los operadores; sin embargo, requiere que el operador perceptiblemente filtre las alarmas, por ejemplo, las alarmas de alta prioridad del resto de alarmas. Si bien, esto representa una gran mejora con respecto a ninguna priorización, puede distraer a los operadores debido a la presencia de alarmas menos importantes.

La presentación de alarmas constituye un aspecto crucial de los sistemas de alarma avanzados. Una gran parte de los sistemas avanzados emplean las pantallas de visualización de datos. En las PVD, la información suele presentarse de forma jerárquica, debido a las limitaciones de espacio. Se origina el efecto o fenómeno *keyhole*, que puede degradar la extracción de información por el usuario, en comparación con un modo de presentación en paralelo, en donde todos los datos se presentan simultáneamente, beneficiando a las características humanas de percepción y atención (Shaw, 1993; van der Schaaf, 1989; Woods et al., 1987). El área limitada de visualización de las pantallas puede imponer una carga a la navegación y a la recuperación de información y, también, impedir una visión general de la situación y mantener la conciencia de las condiciones de la planta (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Shaw, 1993). Esto requiere que el operador “deje que caminen sus dedos” (“*let his fingers do the walking*”)³⁶ (Shaw, 1993, p. 263), solicitando repetidamente diversas páginas del display para ver secciones del proceso (Fink et al., 1992; Hoonhout y Zwaga, 1993; Shaw, 1993). Si

³⁶ En contraste con caminan frente a los paneles de la presentación convencional.

los operadores no obtienen una visión general adecuada del proceso en PVD, disminuye la eficacia de su tarea de monitorización, mientras que la probabilidad de error aumenta, sobre todo durante anomalías graves (van der Schaaf, 1989).

El mayor atractivo de presentar las alarmas en pantallas de sistemas avanzados es su flexibilidad para mostrar información en una amplia variedad de formas (Andow, 1985; Bagchi y Gottilla, 1981; Beattie et al., 1996; EPRI 2003e, 2003a, 2004a, 2005, 2006; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Shaw, 1993; Stanton, 1992; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 2000; Vicente, 1996), por ejemplo, como listas de mensajes o integradas en los diagramas del proceso. Además, permite una presentación más compacta e integra la información a más alto nivel, disminuyendo la cantidad de información que el operador tiene que analizar (O'Hara et al., 1995). Entre las condiciones favorables del sistema de alarma avanzado cabe destacar las siguientes:

- Capacidad de procesamiento de la alarma: análisis de la información de alarma antes de ser mostrada al operador. Las técnicas de procesamiento se aplican para ayudar a reducir el número de alarmas durante anomalías del proceso, con el objeto de que los operadores puedan atender a las más importantes (Bullemer et al., 2011; EPRI, 2003e, 2004a; O'Hara, Brown, et al., 2000), así como para identificar y eliminar alarmas molestas o irrelevantes, redundantes o menos importantes (la alarma puede proporcionar información única, sin embargo, en un determinado contexto, no resulta tan importante como otras alarmas) (EPRI, 2003e, 2004a). Resulta relevante tener en cuenta el impacto del procesamiento de alarmas en los usuarios, ya que cada técnica cambia la información proporcionada al operador (EPRI, 2003e), estando el grado de reducción ligado a las técnicas de procesamiento de alarma aplicadas (O'Hara, Brown, et al., 2000).
- Capacidad de manejar una lógica compleja para mejorar la efectividad del sistema de alarma (entre otros, Brown et al., 2000; EPRI 2003a, 2003e, 2004a; O'Hara, 1996; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Brown, et al., 2000), reduciendo el número alarmas innecesarias que ocurren en transitorios de la planta, para reducir la carga del operador y las distracciones, y hacer las alarmas más útiles para la respuesta a los sucesos (EPRI, 2003e, 2003a). Los operadores prefieren los sistemas de alarma que reducen el número de alarmas que ocurren en las anomalías, permitiendo centrarse en las alarmas más importantes, siendo relevante que el sistema no elimine información importante (Brown et al., 2000; EPRI, 2005; O'Hara, 1996; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Brown, et al., 2000). Beattie et al. (1996) encontraron una preferencia de los operadores a afrontar un mayor número de alarmas cuando no estaban satisfechos con los esquemas aplicados en la reducción de mensajes, en lugar de perder un mensaje que podría ser importante en una situación determinada.
- Capacidad de dar prioridad a las alarmas, es decir, determinar la importancia relativa de las condiciones de alarma (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e; O'Hara, 1996; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Brown, et al., 2000).
- Permite una mejor integración de las alarmas con otra información que los operadores utilizan para controlar la planta (EPRI, 2003a, 2003e, 2004a; Kortland y Kragt, 1978; Thunberg y Osvalder, 2009). Por ejemplo, en las pantallas del proceso (EPRI, 2003a, 2003e, 2004a), en las pantallas de los procedimientos electrónicos o en los displays de visión grupal que facilitan la coordinación del equipo de operación (EPRI, 2004a).
- Los operadores pueden acceder fácilmente a información detallada de la base técnica de la alarma y obtener el correspondiente procedimiento de respuesta a la alarma (EPRI, 2003e).

Los procedimientos de respuesta a la alarma por vía electrónica proporcionan un acceso rápido, sin necesidad de consultar los libros de procedimientos (EPRI, 2004a, 2005).

- Permite a los operadores añadir funcionalidades, por ejemplo, puntos de tarado definidos por el usuario para monitorizar (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e, 2004a; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Vicente, 2007; Vicente et al., 2001).
- Las alarmas pueden ser ordenadas y agrupadas, por ejemplo, por tiempo o por sistema, para ofrecer al equipo de operación diferentes puntos de vista de la información de alarma y apoyar diversas tareas (Brown et al., 2000; EPRI, 2003a, 2003e, 2004a, 2005; J. W. Lee, Kim, Park, Hwang y Lyu, 2010; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; O'Hara, Higgins, Stubler y Kramer, 2000; Vicente, 1996).
- El operador puede disponer de un indicador importante: la secuencia temporal de ocurrencia de la anomalía (Brown et al., 2000; EPRI, 2003a; Marshall y Baker, 1994; Moum et al., 1998; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998; Stanton et al., 1992, 2000).
- Posibilidad de proporcionar los valores reales de parámetros necesarios para responder a una alarma, sin que el operador tenga que buscar esa información (Alm y Osvalder, 2012; Brown et al., 2000; Danchak, 1980, 1982; EPRI, 2005; Gilmore, 1985; Gilmore et al., 1989; Moum et al., 1998; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000).

Entre las principales dificultades, o desventajas, de los sistemas de alarma avanzados, se encuentra la potencialidad de sobrecargar las pantallas de información y, por tanto, de aumentar innecesariamente el número de mensajes de alarma que no proporcionan información adicional al operador. Esto sucede a pesar de la evidencia de que reducir la sobrecarga de alarma puede aumentar el rendimiento del operador y mejorar el valor de la información de alarma (EPRI 2003a; O'Hara, Brown, et al., 2000). A continuación se exponen diversos aspectos relacionados con la presentación de un elevado número de alarmas:

- Frente a los sistemas de control analógico o convencional, en donde los diseñadores sólo incluían las alarmas consideradas esenciales (Brazier, 2010; O'Brien y Woll, 2004; Sørenssen et al., 2002), en los sistemas de control digital o distribuido³⁷ resulta muy fácil y con un coste económico mínimo la introducción de una nueva alarma, ya que la configuración se realiza estableciendo parámetros de configuración en una estación de trabajo de ingeniería (EPRI, 2003a, 2004a, 2005), lo que ha dado lugar a incrementar significativamente el número de alarmas que los operadores deben afrontar (Ahmed, Izadi, Chen, Joe y Burton, 2013; Andow, 1985; Bransby y Jenkinson, 1997; Braun et al., 2011; Brazier, 2010; Campbell Brown y O'Donnell, 1997; Crowe, 2002; Dicken, 1998, 1999a; Farbroth et al., 2000; Koene y Vedam, 2000; Kortland y Kragt, 1978; Kragt y Bonten, 1983; Laberge et al., 2014; Larsson et al., 2006; Lees, 1983; Metzger, 2010; Nimmo, 2005, 2006; O'Brien y Woll, 2004; Shaw, 1993;

³⁷ Shaw (1993) destaca tres tipos generales de problemas de las alarmas en los sistemas de control distribuido (DCS) frente a los paneles convencionales, que suceden porque el operador pierde la conciencia de las alarmas existentes o no percibe nuevas alarmas. El primero es el número de alarmas, la existencia de alarmas molestas que no proporcionan nueva información al operador, no justificar individualmente cada una de las alarmas incluidas en el DCS. El segundo es la localización de nuevas alarmas en los DCS, que resulta más complicada, puesto que el operador tiene que navegar en numerosas páginas para encontrar la alarma. El tercero está relacionado con las alarmas ocultas, no todas las alarmas puedan ser vistas por el operador.

Sørenssen et al., 2002; Stanton y Baber, 1995; Stauffer et al., 2010a; Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009; Yuki, 2002). La mejor integración de las alarmas con otras pantallas, que facilitan los sistemas distribuidos, puede ser anulada por la facilidad de adición de más alarmas (Andow, 1985). Más allá, cuando un sistema de control distribuido ha sido adaptado a una planta, pero se ha mantenido también la instrumentación y el anunciador convencional, la interfaz de operación puede originar que el operador divida su atención entre las distintas interfaces, frecuentemente separadas físicamente y a menudo dispares (Smith, Howard y Foord, 2003). Y, cada vez que hay cambios en el proceso, en el equipo o en el sistema, se añaden, por lo general, alarmas adicionales (Yuki, 2002).

- Considerar, en ocasiones, que un mayor número de alarmas sería mejor (Bagchi y Gottilla, 1981; Brazier, 2010), la filosofía de “más vale prevenir que curar” (Xiao y Seagull, 1999), alarmas del tipo “sería bueno conocer” (Bagchi y Gottilla, 1981), como resultado de una sensación de seguridad inherente (Zwaga y Hoonhout, 1994). Los ingenieros de la planta a menudo añaden alarmas para garantizar no pasar por alto elementos potencialmente críticos (Braun et al., 2011). Como Bray (1989, p. 212) argumenta “en caso de duda, se alarma”. En muchos casos, resulta más fácil añadir otra alarma, en lugar de racionalizar las alarmas existentes (O’Brien y Woll, 2004).
- Incluso una gran cantidad de señales que no son realmente alarmas (no requieren una respuesta), son mensajes sobre situaciones y sucesos normales, se agregan al sistema de alarma (Brazier, 2010; Campbell Brown y O’Donnell, 1997; Sørenssen et al., 2002). De esto modo, el sistema también muestra la posibilidad de crear más alarmas que pueden exacerbar el problema de sobrecarga de alarmas (Ahmed et al., 2013; Brazier, 2010; EPRI, 2003a, 2004a; Yuki, 2002), y aumentar la carga administrativa en la gestión de las alarmas y los procedimientos de respuesta a la alarma (EPRI, 2004a).
- La proliferación de alarmas es también el resultado de que no existen criterios adecuados para decidir qué nivel de prioridad debe ser asignado (Farbrot et al., 2000; Zwaga y Hoonhout, 1994).
- Habitualmente, las alarmas se añaden a los sistemas en las etapas iniciales del proceso de diseño, a menudo antes de desarrollar la filosofía del sistema de alarma y, una vez que están implantadas, resultan difíciles de eliminar o de modificar (Brazier, 2010; Kondaveeti et al., 2012, 2013). Por el contrario, las alarmas se añaden prácticamente al final del diseño, por lo que la funcionalidad del sistema de alarma está limitada a lo que puede ser fácilmente configurado en el sistema de automatización (Alford et al., 2005). Esto es, no existir una filosofía sobre lo que constituye una alarma ni un proceso de diseño para determinarla (Brown et al., 2000; Lees, 1983).
- Las características de auto-diagnóstico de los sistemas digitales pueden proporcionar muchas alarmas detalladas sobre problemas o fallos ya detectados en los sistemas (EPRI 2004a).
- Con los sistemas digitales se tiende a incluir, en mayor medida, listas de mensajes de alarma, estando detallados los principales problemas a continuación.

Además, otra desventaja principal de los sistemas avanzados es que el operador puede no disponer de patrones, o localización espacial, que le asista en el diagnóstico, siendo, por el contrario, la principal ventaja de la presentación en ventanillas, referido anteriormente.

Para terminar, Stanton et al. (2000) cuestionan si los operadores harán uso de toda la información disponible en los sistemas de alarma avanzados.

7.3.1 Listas de mensaje de alarmas

En los sistemas digitales de alarma en PVD se tiende a incluir listas de mensajes de alarma, centrando éstas, por tanto, la mayor parte de la investigación (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

Las listas de mensajes de alarma tienen cuatro ventajas fundamentales. En primer lugar, requieren menos espacio de exposición al mostrar sólo las alarmas activas (Bagchi y Gottilla, 1981; O'Hara, Brown, et al., 2000) y se pueden ubicar en cualquier lugar de la estación de control (Stanton y Baber, 1995). En segundo lugar, proporcionan a los operadores más información de alarma que las pantallas SDCV (EPRI, 2003e, 2005, 2006; Moum et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; Roth y O'Hara, 2002), como la cronología de las alarmas, permite asociar cada mensaje de alarma con un conjunto de información. Consiguientemente, el operador puede observar fácilmente las alarmas recientes y el orden de presentación (Stanton et al., 2000). En tercer lugar, debido a su flexibilidad, se pueden clasificar, ordenar y filtrar de formas diversas, dependiendo de las necesidades de información del operador (EPRI, 2003e, 2005; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b) y se pueden agrupar de diferentes maneras, según el contexto (Vicente, 1996). En cuarto lugar, si es necesario añadir, eliminar o modificar alarmas se puede realizar con un coste mínimo, como se ha expuesto con relación a los sistemas de control distribuido.

Los principales inconvenientes de las listas se encuentran en la ausencia de dedicación espacial y la permanencia de las alarmas, que son los puntos fuertes de la presentación de alarmas en ventanillas.

Existen investigaciones que han mostrado que las listas de mensajes son particularmente difíciles de usar cuando hay una avalancha de alarmas. Los operadores a menudo tienen que buscar información para fundamentar sus decisiones, y la información no está necesariamente disponible de forma inmediata en las pantallas de visualización (Stanton y Baber, 1995), sólo se puede obtener después de solicitarla (Kragt y Bonten 1983), por lo que las listas de alarmas requieren mucho más tiempo para leer y navegar (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e, 2005; Fink et al., 1992; Kragt y Bonten, 1983; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; Roth y O'Hara, 2002).

Cuando los mensajes de alarma llenan la pantalla, o exceden una página, se mueven a través de la lista rápidamente (EPRI, 2003a, 2004a; Salo et al., 2006), las alarmas iniciales se desplazan en la pantalla (Stanton et al., 2000), antes de poder ser leídas por el operador (Bransby, 2001; Brown et al., 2000; Bullemer et al., 2011; Laberge et al., 2014; Mattiasson, 1999; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000), incluyendo en muchos casos alarmas de alta prioridad, lo que puede crear una elevada carga de trabajo (EPRI, 2006; Roth y O'Hara, 2002; Stubler, O'Hara, Higgins y Kramer, 2000), esto es, han demostrado ser problemáticas en condiciones de alta densidad de alarmas (EPRI, 2003a; O'Hara et al., 1995; O'Hara, Brown, et al., 2000; Salo et al., 2006). Ante una sobrecarga de alarmas, el operador a menudo no es capaz de leer el texto de cada nueva alarma, asimilar lo que significa y reconocerla en el sistema (Campbell Brown, 1998; Campbell Brown y O'Donnell, 1997). Las pantallas en serie pueden ser también problemáticas porque enmascaran las alarmas, si se acumulan en cola y permanecen sin respuesta (Bullemer et al., 2011; Laberge et al., 2014; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 2000). Puede resultar difícil encontrar la información más esencial, solicitando los operadores, por consiguiente, mejoras en la priorización de las alarmas (Mikkelsen et al., 2011; Salo et al., 2006).

Nachreiner, Nickel y Meyer (2006) y Li et al. (2011) encontraron listas de alarmas poco estructuradas, basadas sólo en la ocurrencia temporal, pero no en una estructura lógica (relaciones causales) adecuada para un diagnóstico rápido de los fallos del sistema. Por lo que concluyeron que las pantallas de alarma a menudo sólo representan una lista de alarmas impresa mostrada en una pantalla, sin ningún apoyo adicional al operador para el diagnóstico de los fallos (Lees, 1983; Li et al., 2011; Nachreiner et al., 2006).

La descripción de las alarmas en la lista debe ser clara, de modo que no añada carga mental, y no dejar ningún margen a la interpretación o malentendido (Mattiasson, 1999). La pantalla de lista de alarmas tiende a ser demasiado detallada, por la presentación de información secuencial (Bullemer et al., 2011; Zwaga y Hoonhout, 1994), y carece de la organización funcional necesaria para hacer un seguimiento de la progresión de la anomalía (Zwaga y Hoonhout, 1994). Potter y Woods (1991) señalan que, aunque las listas incluyen el tiempo de ocurrencia, el operador tiene que leer y comparar los mensajes; el problema de las listas de mensajes es que imponen un proceso cognitivamente deliberado de búsqueda, recogida, e integración de mensajes individuales, con el fin de construir relaciones y patrones significativos entre los eventos. Las listas de alarmas no aumentaron la conciencia de la situación del operador, medida con SACRI (*Situation Awareness Control Room Inventory*), durante la fase inicial de una anomalía (Hogg, Follesø, Strand-Volden y Torralba, 1995).

Además, las alarmas presentadas en PVD en la estación de trabajo de un operador pueden no estar disponibles para todo el equipo de operación (O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010).

Por último, los operadores a menudo son reacios o reticentes a participar en las tareas de gestión de la interfaz en general y, en particular, cuando se refieren a los sistemas de alarma, por ejemplo, en listas de alarmas con información que no está directamente a la vista (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; Roth y O'Hara, 2002).

Todo esto refleja los principales problemas asociados con la lista de mensajes, fundamentalmente en condiciones de alta densidad de alarmas, destacando, además, entre sus limitaciones la preferencia de los operadores por las pantallas espacialmente dedicadas.

7.3.2 Alarmas integradas en las pantallas del proceso

Se ha llevado a cabo muy poca investigación sobre la integración de las alarmas en las pantallas del proceso y en otros formatos gráficos, y existe además poca experiencia operativa (O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). Los operadores parecen preferir pantallas gráficas que integran la información de alarma y del proceso (Brown et al., 2000), no obstante, los displays integrados de alarmas y gráficos no han mostrado mejorar significativamente la actuación (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Vicente, 1996).

Las pantallas del proceso son útiles para mostrar la relación entre las alarmas y otra información (EPRI, 2003a, 2003e, 2004a), logrando que el significado de la alarma sea más evidente (EPRI, 2003e), mejorando su asociación con los componentes, sistemas y funciones (EPRI, 2004a; Kortland y Kragt, 1978). Favorecen el procesamiento en paralelo, al disminuir la carga cognitiva, permiten a los operadores entender mejor las relaciones entre los elementos de la pantalla y desarrollar

una conciencia de la situación más rápida y precisa (O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 1994, 2000).

La información de alarma se presenta también a otros usuarios del sistema de alarma de la planta. Por ejemplo, las alarmas en una estación de trabajo de mantenimiento se muestran de forma adecuada para su uso por los técnicos de mantenimiento. Las pantallas de alarma también se pueden presentar a los ingenieros y a otros usuarios de la planta encargados de los equipos de vigilancia, la supervisión del comportamiento de la planta y funciones relacionadas (EPRI, 2005).

7.4 INTERACCIÓN DEL OPERADOR CON EL SISTEMA DE ALARMA

La interacción del operador con el sistema de alarma se realiza por medio de una serie de controles, que permiten la gestión de las alarmas (O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b). Los controles son los dispositivos a través de los cuales el personal de operación interactúa con las funciones, los procesos, los sistemas, los componentes y las variables de la planta (EPRI, 2003e).

Los controles mínimos necesarios del sistema de alarma en la sala de control de central nuclear constituyen los medios por los que las alarmas se silencian, reconocen, rearmen y prueban (denominado SART por *Silence, Acknowledge, Reset, Test*) (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e, 2005; O'Hara, Brown, et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b):

- Silenciar: termina la señal audible que está diseñada para alertar al operador de una alarma nueva.
- Reconocer o aceptar: informa al sistema de alarma que el operador es consciente de la nueva alarma entrante. Es decir, la acción de reconocimiento indica que el operador ha visto la alarma. El reconocimiento detiene la indicación visual (parpadeo).
- Rearmar o restablecer: informa al sistema que el operador está dispuesto a que se eliminen las alarmas relativas a parámetros que han regresado a su estado normal. Esto es, la condición anómala se ha eliminado.
- Test: prueba del funcionamiento del sistema de alarma.

El reconocimiento de alarmas se emplea, puesto que el operador necesita darse cuenta de que se han activado nuevas alarmas, diferenciándolas de alarmas existentes previamente (Shaw, 1993). Los operadores conocen la importancia del reconocimiento de las alarmas, pero en la práctica suelen acumularse alarmas sin reconocer (Campbell Brown, 1998; EPRI, 2005; IEC, 2004; Lees, 1983; Shaw, 1993; Sørenssen et al., 2002; Stanton y Baber, 1995; Woods, 1985), ante alarmas repetidas existen alarmas que se reconocen antes de determinar su localización (Stanton, 1992; Stanton et al., 2000), alarmas que silencian y reconocen sin mirar a los paneles anunciadores (Kinkade y Anderson, 1984; Seminara et al., 1976, 1979, 1980), sobre todo ante una avalancha de alarmas, el operador puede a veces aceptar una señal sólo para evitar la señal audible (Hopkins, 2000; Kragt, 1983; Kragt y Bonten, 1983; Sorkin, 1988, 1989; Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995).

Shaw (1993) argumenta que la representación espacial en panel mitiga en parte la ausencia del reconocimiento, nuevas alarmas en otras áreas de la planta son fácilmente separadas por el operador, observando todo el panel simultáneamente. Sin embargo, en un sistema en PVD la presencia de alarmas no reconocidas tenderá a enmascarar las nuevas alarmas o a dificultar su identificación (Shaw, 1993).

Los operadores no siempre aceptan las alarmas cuando son anunciadas, en cambio dejan los nuevos anunciadores en su estado intermitente (sin reconocer) para distinguir entre las nuevas alarmas y las alarmas previamente reconocidas (Stanton y Baber, 1995). Sin embargo, esta práctica sólo parece funcionar hasta un límite máximo de ocho nuevos anunciadores, después del cual los operadores tienen dificultades para recordar su orden de aparición. Cuando se supera este límite, los operadores tienden a cambiar su estrategia y aceptar de forma global todas las nuevas alarmas (los anunciadores que parpadean) (Stanton y Baber, 1995).

Huang et al. (2006, 2007) han llevado a cabo investigación experimental relativa a la introducción de un modo de rearme automático. En un simulador, Huang et al. (2006) estudiaron la viabilidad de un sistema de alarma avanzado con la función de rearme sólo en modo automático, esto es, la alarma se restablece automáticamente después de que el suceso vuelva a su estado inicial de inactividad. Huang et al. (2006) encontraron que el rearme automático de la alarma tiene la ventaja de reducir la carga mental del operador y el tiempo de operación, pero también puede tener efectos adversos si el operador no es consciente de que se ha activado la alarma, lo que puede afectar a su evaluación del estado de la planta. En contraste, el rearme manual recuerda a los operadores la existencia de una condición desactivada, que anteriormente constituyó una desviación, por lo que los operadores están más satisfechos en cuanto a la gestión de las alarmas, la monitorización y la toma de decisiones. En otras palabras, la implantación de ambos modos de rearme es necesaria, teniendo que ser la función de rearme muy flexible de cara a la seguridad de la operación (Huang et al., 2006).

En un estudio posterior, Huang et al. (2007) compararon el modo de rearme y la experiencia en operación (expertos frente a principiantes), empleando un procedimiento de operación ante anomalías. El rearme automático era la forma preferida y resultó más fácil de usar por los principiantes, mientras que los expertos, acostumbrados al rearme manual en sus plantas de referencia, necesitaron más tiempo de adaptación al rearme automático e indicaron en las entrevistas su preferencia por el rearme manual ante un número bajo de alarmas, mientras que el modo automático fue el elegido ante una gran cantidad de alarmas (Huang et al., 2007).

Además de los controles básicos SART, los sistemas avanzados pueden proporcionar numerosas y variadas funciones de gestión de las alarmas. Por ejemplo, el usuario puede definir alarmas temporales, ajustar los puntos de tarado, controlar las opciones de filtrado y ordenar las alarmas de acuerdo con dimensiones diferentes, tales como el tiempo, la prioridad y el sistema (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e; O'Hara y Brown, 1991; O'Hara, Brown, et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008). No obstante, en algunos casos, sobre todo en cuanto a los puntos de tarado, pueden producirse estrictas limitaciones, por estar los cambios bajo control administrativo (EPRI, 2003e).

Se puede utilizar una variedad de medios o dispositivos de control, como pulsadores, teclas de función y controles incorporados en la pantalla para realizar la interacción con el sistema de alarma (EPRI, 2003e, 2005; O'Hara, Brown, et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis y Persensky, 2002b).

Las funciones de gestión de alarmas permiten a los usuarios personalizar y automatizar los aspectos del sistema necesarios para reducir la carga de trabajo (EPRI, 2003e). Sin embargo, los beneficios y los inconvenientes de estas características de gestión de alarmas no han sido investigados, y no hay experiencia operativa suficiente para desarrollar directrices (Brown et al., 2000; O'Hara, Higgins, Brown y Fink, 2008).

7.4.1 Secuencia de los controles SART

Una vez que el sistema anunciador recibe la entrada de la alarma, hay una secuencia de acciones a seguir, con el fin de devolver el proceso a su condición normal.

La versión más antigua del estándar ISA18.1-1979 (ISA, 2004) establecía de forma sistemática las definiciones y los requisitos para las secuencias que el operador debe realizar en el anunciador, desde la ocurrencia de una alarma a la finalización de la condición anómala, así como las opciones y la funcionalidad del anunciador de alarma y el procesamiento de las alarmas (Dzwig, 2008).

El organismo regulador estadounidense NRC, en las guías para las revisiones de diseño de las salas de control del NUREG-0700 (NRC, 1981), presentaba la siguiente secuencia del sistema anunciador (figura 7-1).

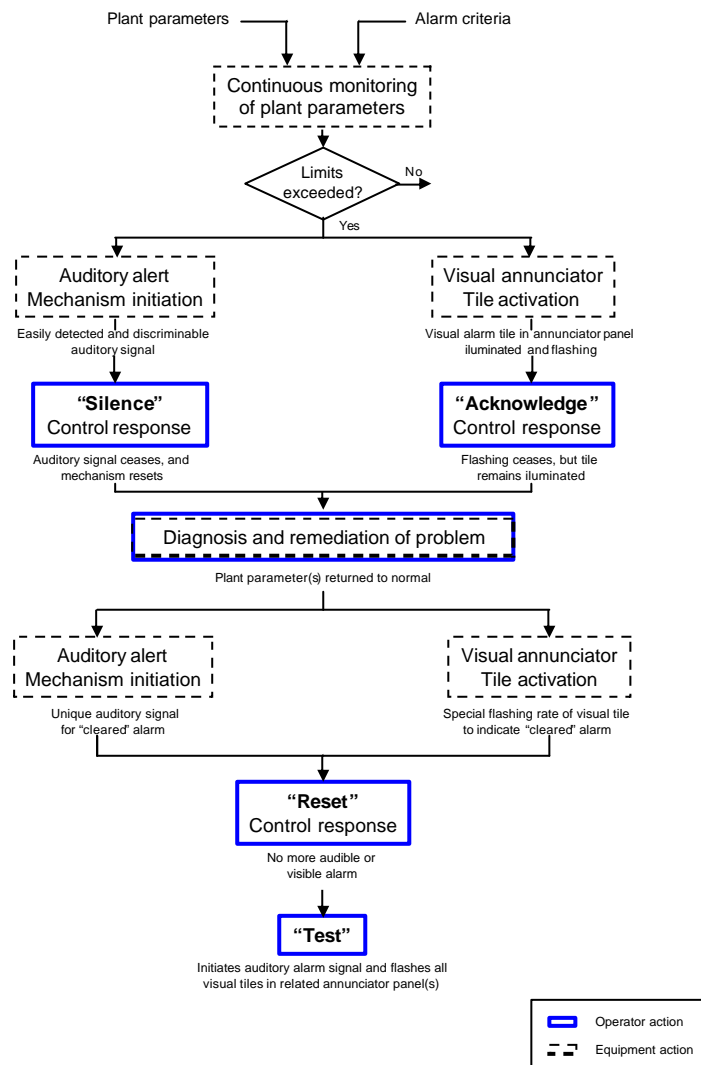


Figura 7-1. Secuencia operacional preferida del sistema anunciador del NUREG-0700 (NRC, 1981).

Cuando se produce una condición de alarma, la ventanilla correspondiente al anunciador comienza a parpadear. Al mismo tiempo, un tono asociado al anunciador indica la nueva alarma. De

esta forma, alerta de la existencia de una desviación en la planta y atrae la atención al mensaje anunciador. Se proporcionan controles (pulsadores) para que los operadores reconozcan la alarma y silencien el tono audible, así como los procedimientos que el equipo de operación tiene que seguir en respuesta a la alarma (EPRI, 2003a; Fink, 1990). El operador debe reconocer la alarma para detener el parpadeo y silenciar el sonido. La ventanilla se ilumina de forma continua hasta que la condición desaparece. Cuando una condición de alarma se desactiva, numerosos sistemas anunciadores muestran el parpadeo de las ventanillas de nuevo (por lo general a un ritmo diferente) y proporcionan un tono audible que puede diferir del tono de una nueva alarma entrante (EPRI, 2003a). Ambos se extinguen cuando el operador rearma la alarma.

La secuencia de operación de un sistema de alarma anunciador, descrita por EPRI (Kinkade y Anderson, 1984, p. 172), se muestra en la figura 7-2.

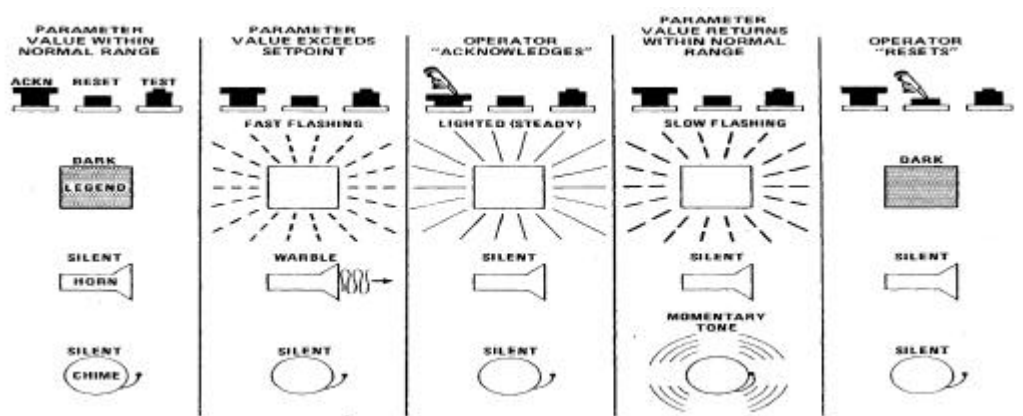


Figura 7-2. Secuencia de operación de un sistema de alarma y anunciador (Kinkade y Anderson, 1984).

Cada medio de presentación de alarmas dispone de unas cualidades asociadas. Stanton y Baber (1995) describen seis posibles estados de una alarma (ver tabla 7-1):

- En el estado de alarma no activada, no hay información presente.
- En el estado activado, todos los medios de presentación muestran sus cualidades para atraer la atención. Es el único estado en que se presenta información por medio audible.
- Cuando se silencia la alarma audible, la alarma visual continúa llamando la atención.
- Al aceptar la alarma visual, se eliminan sus cualidades para atraer la atención.
- El cambio de estado del sistema, cuando la condición ha terminado, puede indicarse por un cambio de la información visual.
- Finalmente, el rearme de la alarma, después de que la condición ha terminado, la alarma volverá al estado de desactivado (o no activado).

Tabla 7-1. Estados de la Alarma (Stanton y Baber, 1995)

Estado	Audible	Anunciador	Texto
No activado	Apagado	Sin alarma	Sin alarma
Activado	Encendido	Intermitente (rápido)	Vídeo inverso
Audible	Apagado	Intermitente (rápido)	Vídeo inverso
Cancelado			
Aceptado	Apagado	Estable (iluminado)	Texto normal
Condición pasada	Apagado	Intermitente (despacio)	Nuevo mensaje
Rearmado	Apagado	Sin alarma	Sin alarma

8 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE RELATIVO A LAS HIPÓTESIS Y LAS PREDICCIONES DEL ESTUDIO

Se resumen los principales resultados de proyectos y actividades de investigación y desarrollo llevados a cabo en relación con la presentación de alarmas y las hipótesis y las predicciones de este estudio.

El estudio del estado del arte presenta los resultados de Kragt et al. en los Países Bajos, los sistemas de alarma HALO y CASH del Proyecto Halden en Noruega, estudios sobre sistemas de alarma de U.S. NRC (contenido del mensaje de alarma, sistema CASH en Noruega y sistema AWARE en Estados Unidos), investigación de EPRI en Estados Unidos, estudios de Stanton et al. en Reino Unido, sistema de alarma de Matsushita et al. en Japón, estudios de campo sobre monitorización en operación normal de Vicente et al. en Canadá, investigación llevada a cabo por profesores de la Universidad de Chalmers en Suecia, estudios ergonómicos de campo realizados por Carvalho et al. en Brasil, investigación de *Korea Atomic Energy Research Institute* (Kaeri) en Corea del Sur e investigación de Torralba et al. en España.

8.1 INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMA DE ALARMA DE KRAGT

Kragt (1983, 1984) ha investigado experimentalmente el modo de presentación de información de alarmas en paralelo (o simultáneo) frente a secuencial (o en serie) y sus efectos en el comportamiento humano. Los tipos de sistemas de alarma empleados por Kragt (1983, 1984), en el contexto de un proceso químico simulado, fueron la disposición convencional de ventanillas en panel, un modelo similar al sistema convencional presentado en PVD, y una presentación secuencial de mensajes alfanuméricos de alarma en PVD. Veinticuatro operadores en formación de una planta química participaron en la simulación de control del proceso, ninguno de ellos estaba familiarizado con los tipos de sistemas; los operadores realizaron las tareas en las tres condiciones del sistema. Las principales variables dependientes fueron los errores de los operadores así como las estimaciones de la dificultad de la tarea y entrevistas con los operadores.

Los resultados de Kragt (1983, 1984) mostraron que la presentación secuencial de alarmas resultó inferior, en cuanto a la actuación del operador y las valoraciones subjetivas de los operadores, en comparación con el sistema convencional de ventanillas. Los operadores experimentaron dificultades en el reconocimiento de patrones de alarmas cuando utilizaron la pantalla secuencial. Esto es, la ventaja del diseño convencional fue debida a que los operadores interpretaron la información de las alarmas en ventanillas de un vistazo, mientras que en la lista de mensajes alfanuméricos, al no tener una posición fija, necesitaban leer los mensajes de texto para entender el estado de la planta. La diferencia entre ambos modos de presentación resultó aún mayor en condiciones de elevada densidad de alarmas, ya que cuando se activaron numerosas alarmas, los sujetos no fueron capaces de mantener una visión general del proceso empleando la lista de mensajes, lo que si fue posible con las alarmas en ventanillas.

Kragt (1983, 1984) atribuye los resultados a la forma de presentar la información (secuencial frente a simultánea), pero no a la tecnología (cableado frente a pantalla de ordenador). En su opinión, una presentación simultánea es necesaria para una tarea en donde las decisiones tienen que ser

tomadas rápidamente³⁸. Por último, Kragt (1983, 1984) recomienda evitar la presentación de información de alarma únicamente en pantalla de visualización, y hace un alegato para tener en cuenta la presentación simultánea y la secuencial en el desarrollo de nuevos sistemas.

8.2 EXPERIMENTOS DEL PROYECTO HALDEN DE LA OCDE CON SISTEMAS DE ALARMA

El Proyecto Halden tiene una amplia experiencia en el diseño, el desarrollo y la evaluación de sistemas de alarma computarizados y avanzados. En primer lugar, se presentan los resultados de estudios llevados a cabo con el sistema de alarma HALO. En segundo lugar, se exponen los resultados de un estudio experimental para analizar el uso dado al sistema de alarma CASH, mediante el análisis de datos de seguimiento de movimientos oculares. En tercer lugar, se presenta el resultado de datos recogidos en relación a la interfaz del sistema de alarma CASH.

8.2.1 Experimentos del Proyecto Halden con el sistema de alarma HALO

El Proyecto Halden entre los ochenta y los noventa llevó a cabo el diseño, la implantación y la evaluación de un sistema avanzado de tratamiento de alarmas, denominado HALO. La aproximación y los principales resultados con el sistema HALO se desglosan en tres estudios consecutivos.

8.2.1.1 Primer estudio del sistema de alarma HALO

En 1982 se llevó a cabo una evaluación preliminar y estática del sistema de alarma HALO (Marshall, 1982), antes de acoplarlo al simulador compacto STUDS de HAMMLAB. El objetivo era retroalimentar al concepto del display de HALO (Visuri y Øwre, 1982), para lo que compararon tres formas de presentar la información: lista de alarmas sin filtrar, lista de alarmas filtradas y lista de alarmas filtradas junto con el diagrama de visión general de HALO (Marshall, 1982). Los sujetos experimentales fueron estudiantes (Marshall, 1982). Una característica destacada del diagrama general es que no mostraba texto, en cambio presentaba diversos iconos para identificar los tipos generales de alarmas (Visuri y Øwre, 1982, p. 23).

Los resultados de Marshall (1982) indicaron que las listas filtradas mejoraron significativamente la actuación, pero que la condición de listas filtradas junto con el diagrama de visión general de HALO no acrecentó mayormente, de forma estadísticamente significativa, la actuación, lo que atribuyeron a la falta de familiaridad de los sujetos experimentales con el display.

8.2.1.2 Segundo estudio del sistema de alarma HALO

A partir de los resultados del estudio de Marshall (1982), se implementó la primera versión de HALO (HALO-I), que constaba de 3 niveles jerárquicos (diagrama general, 15 pantallas detalladas que comprenden 15 grupos de sistemas de alarma y los formatos del proceso NORS), empleando pantallas de visualización de datos en el simulador NORS de HAMMLAB (Hollnagel y Øwre, 1984). El operador puede acceder a una pantalla de visualización independiente de segundo nivel, que

³⁸ Lind (1991), en un estudio en laboratorio, encontró que la presentación simultánea llevó a tiempos de decisión sustancialmente más cortos que la presentación secuencial, y que este efecto no disminuye con la práctica. Atribuye el efecto a una interferencia en la memoria de trabajo entre la información empleada para la decisión y la información empleada para controlar la interfaz.

muestra un sinóptico del proceso, en donde los símbolos intermitentes indican el sistema afectado, y proporciona mensajes textuales de alarma.

La evaluación experimental del sistema de alarma HALO-I comparó tres formas de presentar la información: alarmas de texto sin filtrar (sistema de alarma de NORS), alarmas de texto filtradas (versión de texto de HALO) y alarmas filtradas presentadas en un formato combinado, texto y simbólico (versión simbólica de HALO) (S. Baker, Gertman, et al., 1985; S. Baker, Hollnagel, et al., 1985; Hollnagel y Øwre, 1984). En esta última condición, se presentaba la pantalla de visión general de alto nivel de alarmas. Cuando una alarma se activa, los símbolos que representan los subsistemas parpadean con el color conforme a la prioridad. En las tres condiciones experimentales, se presentaba información detallada incorporada en los formatos del proceso. El sistema de filtrado reducía las alarmas en un promedio aproximado del 50%, no estando disponibles, para el operador, las alarmas filtradas (S. Baker, Gertman, et al., 1985). El objeto principal del experimento era analizar el efecto del filtrado en la actuación del operador y, si existe algún efecto, la forma de presentar la información de las alarmas filtradas. Siete equipos, de dos operadores cada uno, emplearon los tres sistemas en doce escenarios simulados.

Los resultados revelaron escasas diferencias sistemáticas de comportamiento (Marshall et al., 1987). No hubo diferencias significativas entre los tres sistemas de alarma en las medidas de diagnóstico, verificaciones y acciones, pero el tiempo de detección fue menor en la presentación textual; podría atribuirse al relativamente bajo nivel de filtrado (S. Baker, Gertman, et al., 1985; S. Baker, Hollnagel, et al., 1985). No obstante, existieron tendencias favorables hacia los dos sistemas de alarma que emplearon filtrado. Los resultados de la evaluación de HALO-I más relevantes son (S. Baker, Gertman, et al., 1985; S. Baker, Hollnagel, et al., 1985):

- Cuando el número de alarmas era bajo, el sistema de lista de alarmas era tan bueno como el sistema simbólico HALO para las funciones de alerta y de detección. Cuando el número de alarmas era superior a una página de la pantalla, el sistema simbólico HALO resultó mejor.
- Se observó que varios de los sujetos tendían a concentrarse en las alarmas iniciales para solucionar los problemas asociados, sin prestar suficiente atención a las alarmas posteriores.
- El grado de filtrado resultó bajo, puesto que se centraron en el disparo de turbina y el disparo del reactor. Posiblemente habría que aplicar el filtrado cuando el sistema de protección de la planta está en operación y también durante operación normal.
- No existía acuerdo entre los operadores sobre el rearme automático de las alarmas, cuando la condición de alarma desaparece.
- Los operadores encontraron útiles las pantallas gráficas.
- La navegación en los dos niveles de HALO no resultó óptima (incómoda y lenta) para un entorno de sala de control avanzada.

A la hora de interpretar los resultados de este estudio, el modo de presentación de la información y el uso del filtrado de alarmas fueron confundidos experimentalmente, por lo que no se pueden establecer conclusiones sobre los efectos independientes del modo de presentación y del filtrado (O'Hara, Brown, et al., 2000).

8.2.1.3 Tercer estudio del sistema de alarma HALO

El resultado de la segunda evaluación experimental de HALO (S. Baker, Gertman, et al., 1985; S. Baker, Hollnagel, et al., 1985; Hollnagel y Øwre, 1984) dio lugar a revisar el diseño de la

interfaz del sistema HALO (HALO-II), en donde eliminaron los formatos de grupos de sistemas de alarma, distribuyendo parte de su información al diagrama general y a los formatos del proceso. La información del proceso se incluyó en la pantalla general de HALO junto con la información de alarma (Reiersen, Evjen y Molteberg, 1987, p. 10).

La tercera evaluación del sistema de alarma HALO (Marshall et al., 1987; Reiersen, Evjen y Molteberg, 1987) comparó la pantalla general simbólica (gráfica) de alarmas de HALO-II y la información de alarmas incorporada en los formatos del proceso NORS (HALO-II), con ventanillas anunciadoras convencionales, que constaban de quince bloques de alarmas, cada una con diez ventanillas de alarmas (representando un tren del agua de alimentación), sin mostrar información de alarma en los formatos del proceso (Reiersen, Marshall y Baker, 1987). Ninguna de las condiciones experimentales incluyó alarmas en lista cronológica de texto, pero sí que emplearon filtrado de alarmas en ambos sistemas. Diez sujetos (cuatro operadores y seis voluntarios del Proyecto Halden) participaron en el estudio. Los sistemas se compararon bajo una variedad de transitorios de larga duración, incluyendo períodos de monitorización pasiva junto con la tarea de aumentar la potencia de una turbina desde parada caliente al 92% de potencia, con el objeto de evitar que los sujetos estuvieran esperando que pasara algo, centrando, por tanto, la atención en el sistema de alarma (Marshall et al., 1987). Reiersen, Marshall y Baker (1987) investigaron aspectos relacionados con la presentación de alarmas (no contemplaron aspectos del filtrado de alarmas), fundamentalmente en qué grado los sistemas avanzados mejoran la actuación en comparación con un display anunciador convencional.

Los resultados generales de Marshall et al. (1987) y Reiersen, Marshall y Baker (1987) indican que los sujetos actuaron bien con el sistema de alarma en PVD y que la pantalla general de alarmas era fácil de usar. Las alarmas se detectaron con celeridad, y la información de la pantalla general facilitó de modo rápido y eficiente la selección de los formatos del proceso para las secciones de la planta con anomalías. La inclusión de información de alarmas en los formatos del proceso también proporcionó prontitud en la localización de las variables de la planta con anomalías. En contraste, los sujetos que participaron con anunciadores convencionales en ventanilla, experimentaron dificultades para relacionar las alarmas con los formatos del proceso; la ausencia de información de alarmas en los formatos del proceso en la condición convencional deterioró la actuación. Por otro lado, no existió ninguna ventaja evidente de cualquiera de los sistemas en la detección de los sucesos anómalos o en la localización de un parámetro desviado. Específicamente, en cuanto al tiempo de detección de fallos, el sistema avanzado resultó más rápido en dos escenarios, el sistema convencional más rápido en un escenario, no existiendo diferencias en el cuarto escenario. También encontraron que los sujetos frecuentemente eligieron no atender a nueva información de alarmas cuando estaban concentrados en descubrir las implicaciones de las alarmas anteriores o cuando estaban centrados en una hipótesis.

Marshall et al. (1987) y Reiersen, Marshall y Baker (1987) llegaron a la conclusión de que en una sala de control avanzada el sistema de alarma debe estar integrado en el sistema informático y encontraron una desventaja en utilizar un sistema de alarma convencional independiente. Esto es, no hallaron evidencia para apoyar la creación de paneles de ventanillas independientes. Por último, un sistema de alarma avanzado no debería limitarse a listas de mensajes de texto de alarmas, los sujetos experimentales mostraron una clara preferencia por el uso de símbolos y colores en la presentación de información.

8.2.1.4 Resumen de los experimentos con el sistema de alarma HALO

Los diferentes experimentos llevados a cabo por el Proyecto Halden, comparando distintas interfaces de alarmas del sistema HALO (incluyendo listas de alarmas y diagramas del proceso), indican lo siguiente:

- La evaluación preliminar estática de HALO mostró que las listas filtradas mejoraron significativamente la actuación, pero que disponer, además, de la pantalla de visión general de HALO no incrementó en mayor medida la actuación.
- La segunda evaluación de HALO mostró que cuando el número de alarmas era bajo, el sistema de lista de alarmas era tan adecuado como el sistema simbólico de HALO, para las funciones de alertar y detectar. Cuando el número de alarmas era superior al que cabe en una pantalla, el sistema simbólico de HALO resultó más conveniente.
- La tercera evaluación experimental no mostró diferencias estadísticamente significativas en el uso de alarmas en la lista de texto comparada con la combinación de alarmas en lista de texto junto con una versión modificada de la pantalla general de HALO, excepto para uno de los seis sujetos experimentales que actuó mejor sin la lista de alarmas.

8.2.2 Investigación del Proyecto Halden relacionada con el sistema de alarma CASH

El Proyecto Halden ha diseñado, implantado y evaluado la interfaz del sistema de alarmas CASH en HAMMLAB. Se incluyen comentarios de operadores al diseño de la interfaz, lecciones aprendidas y recomendaciones de los diseñadores del sistema de alarma CASH, los resultados de la evaluación de factores humanos del sistema de alarma CASH, y los hallazgos de un experimento sobre el uso del sistema de alarma CASH.

8.2.2.1 Comentarios de los operadores al diseño de la interfaz del sistema de alarma CASH

El apartado presenta comentarios proporcionados por operadores profesionales que han participado en experimentos de alarmas en HAMMLAB, empleando el sistema de alarma CASH. Estos comentarios fueron recogidos por los diseñadores del sistema de alarma del Proyecto Halden.

Los principales comentarios proporcionados por los operadores a la configuración de CASH de lista de alarmas y de alarmas en ventanilla del experimento de automatización se destacan a continuación en la tabla 8-1 (Moum et al., 1998). Algunos comentarios se van a exponer a continuación en el apartado de estudios de sistemas de alarmas de U.S. NRC, indicados en esta tabla en cursiva, no obstante los diseñadores del sistema CASH obtuvieron información adicional, orientada a la mejora del diseño del sistema.

Tabla 8-1. *Comentarios de los Operadores al Sistema de Alarma CASH (Moum et al., 1998)*

Configuración	Comentarios de los operadores al sistema de alarma CASH
Alarmas en ventanilla	<ul style="list-style-type: none"> – Los operadores encontraron los iconos más fácil de entender y rápido de interpretar que los mensajes de texto, aunque a veces tuvieron problemas para entender el texto abreviado en inglés. – <i>Cuando había muchas alarmas, los operadores empleaban más las ventanillas y menos las listas.</i> – El display en ventanilla proporciona el nivel alto de supresión de alarmas, puesto que sólo se muestran alarmas clave. – Los operadores preferían las alarmas en ventanillas de CASH en comparación con las ventanillas convencionales de la planta.

Configuración	Comentarios de los operadores al sistema de alarma CASH
Alarmas en ventanilla	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Los operadores echaron de menos la secuencia temporal y la fecha de anunciación de las alarmas, que es importante para diagnosticar lo que está sucediendo en la planta. También es importante saber si la alarma lleva más de un día activa.</i> – <i>El beneficio de emplear alarmas en ventanillas es que las alarmas clave siempre están visibles, no quedan ocultas en los mensajes de la lista de alarmas, y siempre se observan de un vistazo.</i> – Las alarmas clave se muestran tanto en las ventanillas de alarmas como en las listas de alarmas, existiendo por tanto una duplicación de alarmas clave en las dos pantallas del sistema alarmas, estando los operadores de acuerdo con la configuración del diseño.
Lista de alarmas	<ul style="list-style-type: none"> – Empleaban las listas para las primeras alarmas. Las listas son importantes para diagnosticar el suceso iniciador. – <i>Cuando hay muchas alarmas las listas no resultan satisfactorias porque ocultan la información de alarmas.</i> – <i>Las listas de alarmas son útiles al mostrar la secuencia de las alarmas.</i> – Los operadores prefieren la agrupación de alarmas por puesto a la configuración por prioridades de C. N. Loviisa. – La mayoría de los operadores sólo reconocían las alarmas de su lado (primario o secundario). – Es muy útil presentar el valor real de las medidas en alarma, en la lista de alarma, puesto que no resulta necesario seleccionar un formato del proceso para sólo comprobar el valor, se puede ver junto con la alarma.

En cuanto al contenido del mensaje de alarmas, los comentarios proporcionados por dos equipos de operadores en un experimento realizado por el Proyecto Halden relativo a la composición del equipo de operación (*staffing*) a la lista de alarmas, cuando ésta estaba compuesta por un símbolo anunciador, el código del formato del proceso NORS, el texto de la alarma y la severidad se presentan en la tabla 8-2 (Moum et al., 1998).

Tabla 8-2. *Comentarios de Operadores al Contenido de la Lista de Alarmas (Moum et al., 1998)*

Configuración	Comentarios de los operadores a la lista de alarmas de CASH
Lista de alarmas	<ul style="list-style-type: none"> – Resulta difícil emplear el mensaje de alarma sin el tiempo de ocurrencia y sin el identificador TAG, recomendando los operadores incluir el TAG en el texto de alarma. Un comentario fue: <i>“Alarm text is for beginners while alarm tag is for advanced operators.”</i> – La mayoría de los operadores consideraron que los primeros ocho caracteres del TAG de la alarma resultaban adecuados, pero otros operadores indicaron que deberían usarse los once caracteres. – El código del formato del proceso NORS no se emplea (al menos por operadores con experiencia). – La secuencia de alarmas es más importante que el momento temporal exacto de ocurrencia. – Se necesita tanto el tiempo de ocurrencia como la fecha de aparición cuando las alarmas llevan activas más de un día.

8.2.2.2 Lecciones aprendidas y recomendaciones de los diseñadores del sistema de alarma CASH

Las principales recomendaciones, con respecto a la presentación de las alarmas, de diseñadores del sistema de alarma CASH, basándose en las entrevistas realizadas a operadores y en sus propias experiencias en el uso del sistema CASH, se presentan en la tabla 8-3 (Moum et al., 1998).

Tabla 8-3. *Recomendaciones de Diseñadores del Sistema de Alarma CASH* (Moumet al., 1998)

Característica	Recomendaciones de los diseñadores del sistema de alarma CASH
Contenido de lista de alarmas y de alarmas en ventanilla	<ul style="list-style-type: none"> – Lista de alarmas: prioridad de la alarma (código de color), anunciación visual, fecha, hora, identificador de la alarma, descripción textual, severidad, valor real, límite de la alarma y unidad de medida. – Alarmas en ventanillas: ubicar en los mismos sistemas las alarmas que se muestran juntas en los paneles, además, también recomiendan usar iconos (en vez de texto) que sean claros y distintivos, así como mostrar la prioridad por código de color.
Alarmas clave	<ul style="list-style-type: none"> – Las alarmas clave deberían estar siempre visibles en displays o paneles aparte. – Si hay al menos dos operadores que sean responsables de partes diferentes del proceso, recomiendan separar sus alarmas en paneles y/o displays de alarmas, para facilitar el reconocimiento de la alarma e identificar al responsable.
Silenciar, reconocer y comprimir	<ul style="list-style-type: none"> – Cada operador dispondrá de un botón para silenciar. – Habrá dos botones para reconocer y dos botones para comprimir en cada puesto de operador, uno para las alarmas relacionadas con su puesto y otro para todas las alarmas.
Anunciación de alarmas	<ul style="list-style-type: none"> – Todas las alarmas se anunciarán de forma audible, empleando sonidos diferentes para cada prioridad. – Los operadores sólo deberían silenciar las alarmas de máxima prioridad, mientras que el resto de las alarmas se silenciarían automáticamente después de uno o dos segundos. – Anunciar las nuevas alarmas con un símbolo destellando en la lista de alarmas, mientras que en las alarmas en ventanilla recomiendan emplear un marco destellando alrededor de la ventanilla. – Anunciar las alarmas desactivadas por un cambio del código de color (gris-blanco).
Código de color	<ul style="list-style-type: none"> – Emplear un color para cada prioridad (rojo para primera, amarillo para segunda y verde para tercera) y otro color para las alarmas desactivadas (gris-blanco). – Emplear los colores asignados a alarmas solamente para las alarmas.
Estructura de los mensajes	<ul style="list-style-type: none"> – Emplear letras en mayúscula. – Emplear de forma consistente las reglas en las abreviaturas, eligiendo siempre las abreviaturas empleadas habitualmente, y usar como regla principal truncar las palabras, aunque para que las abreviaturas sean más legibles también se pueden comprimir palabras.
Estructura de la lista de alarmas	<ul style="list-style-type: none"> – Mostrar un mensaje de alarma por línea. – Organizar los mensajes de alarmas en columnas, de forma que se facilite la búsqueda vertical así como la selección de las partes del mensaje. – Dividir la lista de alarmas por secciones de entre 5 y 7 alarmas empleando una línea de separación de puntos para facilitar la búsqueda horizontal. – Emplear un color neutro en el fondo para maximizar el contraste de las alarmas en rojo y en amarillo.

8.2.2.3 Evaluación de factores humanos del sistema de alarma CASH en HAMMLAB

La evaluación de la interfaz de CASH se ha realizado por medio de una variedad de técnicas: entrevistas con personal de HAMMLAB, revisión de cintas de vídeo de experimentos y una evaluación estática mediante la aplicación de guías y directrices de factores humanos y de revisiones basadas en la experiencia (Sebok et al., 1999). Los principales resultados de Sebok et al. (1999) se muestran a continuación en la tabla 8-4.

Tabla 8-4. *Resultado de la Evaluación de la Interfaz del Sistema de Alarma CASH (Sebok et al., 1999)*

Configuración	Recomendaciones de la evaluación de la interfaz del sistema de alarma CASH
Alarmas en ventanilla	<ul style="list-style-type: none"> – La principal ventaja de las alarmas en ventanillas es que ofrecen información basada en el reconocimiento de patrones, en vez de tener que leer una lista con texto. Pero este proceso requiere que los operadores tengan experiencia en el proceso, por lo que recomiendan entrenar a los operadores a usar ambas pantallas de alarmas: listas y ventanillas. – Presentar de forma consistente la información del nivel en los formatos del proceso y en las ventanillas. – Modificar las líneas para distinguir los grupos funcionales en las ventanillas haciendo más gruesas las que rodean los grupos funcionales, y más finas aquellas que separan los grupos del generador de vapor de cada tren. – Etiquetar los cuatro generadores de vapor en las ventanillas. – Las ventanillas están repletas de información de símbolos y de texto dificultando la lectura. – Existencia de algunos símbolos inconsistentes entre las ventanillas de alarmas y otras partes de la interfaz. – Las abreviaturas empleadas en las ventanillas de alarmas y en los formatos del proceso no se usan consistentemente.
Lista de alarmas	<ul style="list-style-type: none"> – Indicar la prioridad de las alarmas, además de por el código de color, con una codificación redundante (como puede ser añadir un número de prioridad de 1 a 3). – Relacionar las listas de alarmas con los formatos del proceso o con los sistemas. La segunda columna de la lista de alarmas proporciona información sobre el origen de la alarma, que a menudo indica el display al que el operador debe acceder para obtener información adicional. Siendo especialmente importante para operadores principiantes que no están familiarizados con la interfaz y necesitan ayuda para navegar en información más detallada a partir de la información de alarmas. Por lo que recomiendan añadir una columna incluyendo el formato relevante del proceso. – Recomendamos presentar el texto del mensaje de la alarma en la lista de alarmas en letra mayúscula y minúscula.

8.2.2.4 Experimento del Proyecto Halden sobre el uso del sistema de alarma

Con el objeto de explorar el rol del sistema de alarma, Skraaning y Andresen (1999) realizaron un estudio basado en el análisis de la actividad visual (registros de movimientos oculares) del operador durante una anomalía simulada de una central nuclear en HAMMLAB. Examinaron en qué grado y con qué propósitos los operadores emplean el sistema de alarma en salas de control avanzadas durante la solución de problemas complejos. Registraron datos de frecuencia (número de accesos visuales)³⁹ y de duración (porcentaje de tiempo)⁴⁰ de los accesos visuales al sistema de alarma CASH por unidad de tiempo, agrupando los datos en períodos de un minuto a lo largo de todo el escenario.

Encontraron una media de 2,69 accesos visuales por minuto de los operadores a las pantallas de alarma durante el escenario, y un 7,6% del tiempo de escenario disponible mirando al sistema de alarma. Los resultados corroboraron la hipótesis experimental desarrollada por un panel de cinco expertos en operación del Proyecto Halden, estimaron que los operadores en salas de control avanzadas emplearán el sistema de alarma menos del 10% del tiempo disponible en el escenario (Skraaning y Andresen, 1999).

Para explorar la cantidad de actividad visual de los operadores en el sistema de alarma durante diferentes fases del escenario, tomaron de referencia el modelo genérico de control del proceso de

³⁹ En los datos de frecuencia se registra cada vez que la cruz se detiene sobre un AOI.

⁴⁰ En los datos de duración se registra cuando la cruz entra y sale de un determinado AOI.

Hallbert y Meyer (1995): monitorización, detección y solución de problemas. Los resultados muestran que el sistema de alarma se empleó durante el tiempo disponible de escenario del siguiente modo: 1% en la fase de monitorización, 11,9% en la detección y 7,6% en la fase de solución de problemas. El número medio de accesos visuales por minuto ha sido: 1 en la monitorización, 4,2 en la detección y 2,6 accesos visuales por minuto en la fase de solución de problemas.

El operador de reactor empleó el sistema de alarma algo más que el operador de turbina en el escenario. No encontraron efectos de interacción entre la fase del escenario y la posición del operador.

Por último, Skraaning y Andresen (1999) llevaron a cabo un análisis de tendencias, en períodos de un minuto, que confirmó la hipótesis del panel de expertos sobre la existencia de una tendencia cuadrática, cuando se implementan las anomalías (fase de detección), en el uso del sistema de alarma por parte de los operadores.

Skraaning y Andresen (1999) encontraron, mediante el análisis de movimientos oculares de operadores en HAMMLAB, que la función primaria del sistema de alarma es alertar a los operadores cuando ocurren anomalías en el proceso, mientras que el rol secundario está en proporcionar información retrospectiva sobre los sucesos acontecidos en el proceso. En resumen, los datos indicaron que el sistema de alarma tiene diferentes funciones durante el proceso de solución de problemas. Por ello, Skraaning y Andresen (1999) sugieren que el sistema de alarma debería dividirse en varios sub-sistemas, de modo que el diseño del sistema de alarma abarque, por una parte, un número limitado de alarmas importantes en una pantalla permanente de gran tamaño en combinación con alarmas audibles para la fase de detección y, por otra parte, la información destallada de las alarmas estará disponible en pantallas que pueden seleccionar los operadores, con capacidad de reducción y búsqueda de alarmas para la fase de solución de problemas.

8.3 ESTUDIOS SOBRE SISTEMAS DE ALARMA DE U.S. NRC

El organismo regulador estadounidense NRC ha patrocinado estudios de observación y experimentales en simulador sobre sistemas de alarma, destacando un estudio sobre el contenido del mensaje de alarma, un experimento controlado realizado en las instalaciones del Proyecto Halden y un estudio relacionado con la introducción de tecnologías avanzadas en una sala de control convencional.

8.3.1 Investigación de Danchak sobre el contenido del mensaje de alarma

Danchak (1980) llevó a cabo un estudio para identificar qué información necesitan los operadores de central nuclear para responder a una alarma. Inicialmente realizó una comparación del contenido de la presentación de varios sistemas de alarma, encontrando un total de quince campos diferentes de información, empleados en diversas combinaciones, ninguno de los sistemas incluía todos los campos. Entonces analizó, con veintiún operadores de reactor nuclear, cuál de los quince campos de información identificados era necesario y suficiente para responder adecuadamente a la alarma. Los resultados del análisis de los requisitos de información se muestran a continuación, por orden de mayor a menor importancia, con un ejemplo entre paréntesis (Danchak, 1980; Gilmore, 1985; Gilmore et al., 1989):

1. Descriptor. Nombre del parámetro en alarma (presión del presionador, temperatura de la rama caliente).

2. Valor actual/estado. El valor real del parámetro que entró en alarma (presión del presionador - 2500).
3. Punto límite de tarado. El límite que se ha transgredido, que hace que el parámetro active la alarma (límite alto de la presión del presionador = 2450).
4. Indicador de severidad de la alarma. Una denominación sencilla que especifica qué punto límite de tarado ha sido transgredido (alto alto, alto, bajo, bajo bajo).
5. Unidades de medida. Unidades asociadas con los valores que se muestran (grados, galones/minuto).
6. Prioridad. Un indicador que refleja la importancia del parámetro cuando se alarma (prioridad 1, prioridad 2).
7. Designación principal del sistema. Nombre del sistema principal del que el parámetro en alarma constituye una parte (refrigerante, sistema de control químico y volumétrico).
8. Límites de la alarma. Todos los posibles puntos de tarado (o ajuste) que están asociadas con un determinado parámetro en alarma (puntos de tarado alto/bajo).
9. Hora de ocurrencia. La hora, los minutos y los segundos cuando el parámetro entró en alarma (10:14:56).
10. Etiqueta de calidad. Indicador generado por ordenador que refleja el nivel de confianza del instrumento de medición de la alarma (fuera de rango, cuestionable).
11. Referencia. Un indicador que señala al operador dónde puede encontrar más información acerca de la alarma (número de página de la pantalla, panel).
12. Número de detector. El identificador del diagrama del proceso del detector que mide el valor real de la alarma (PCDAXL03).
13. Número de identificación del punto. Número utilizado para acceder al parámetro alarmado desde el ordenador (NCP103).
14. Número de secuencia. Un número que indica la posición del parámetro en alarma en la lista total de alarmas (N ° 25).
15. Fecha de ocurrencia. El mes, día y año en que se produjo la alarma (02/24/78).

Se pueden agrupar por categorías funcionales del siguiente modo (Danchak, 1980):

- ¿Qué hay en la alarma?: número de detector, designación principal del sistema, descriptor y número de identificación del punto.
- Severidad de la alarma: indicador de severidad de la alarma, valor actual/estado y punto límite de tarado.
- ¿Cuándo sucedió la alarma?: fecha de ocurrencia, número de secuencia y hora de ocurrencia.
- Información adicional: límites de la alarma, unidades de medida, etiqueta de calidad y referencia.

Las principales conclusiones de estos resultados son las siguientes (Danchak, 1980, 1982; Gilmore, 1985; Gilmore et al., 1989):

- Los operadores quieren una indicación simple de lo que es la alarma y tanta ayuda como sea posible en la determinación de su severidad.
- El descriptor satisface el primer criterio, mientras que campos como el valor actual/estado, el límite de la alarma, el indicador de severidad y, quizás, la prioridad satisfacen el segundo.
- Ítems como la hora de ocurrencia, el número de identificación del punto y el número de secuencia son de dudoso valor.

- La fecha de ocurrencia es, obviamente, algo que el operador no necesita.

Posteriormente, Danchak (1982) investigó la disposición y estructura del contenido del mensaje de alarma. Los datos no fueron estadísticamente significativos, pero había una tendencia a tiempos medios de respuesta más rápidos y desviaciones más pequeñas ubicando los datos cuantitativos (valor actual y límite) en primer lugar, delante del descriptor cualitativo, para ayudar al operador en las tareas de lectura y de recuperación. Es más fácil reconocer las palabras que recordar los números. El resultado se vio reforzado por los comentarios de los sujetos experimentales y por las observaciones del experimentador. Danchak (1982) recomienda también presentar el valor actual y el valor límite en un formato tabular con el valor actual en la parte superior del valor límite, puesto que para los operadores representa una tarea de comparación. La estructura del mensaje de alarma se apoya en un principio psicológico llamado el efecto de posición serial (Murdock, 1962), que establece que en el recuerdo de datos sin sentido, los sujetos recuerdan más fácilmente el comienzo y el final de los datos, en lugar de la parte intermedia.

Danchak (1988, citado en Hollywell y Marshall, 1994) mostró la importancia de la estructura del mensaje textual de alarma. Empleó un sistema de presentación de alarmas en PVD para investigar si existían diferencias en actuación por la forma en que estaba estructurado el mensaje de alarma en cuanto a la posición dentro del mensaje. Los sujetos tenían que mirar a la pantalla, que mostraba un único mensaje de alarma, cuando escuchaban un tono audible. Cuando el sujeto entendía el mensaje debía presionar un botón. Entonces, el sujeto tenía que duplicar el mensaje de alarma en un formato estándar. Cuando el sujeto había completado la tarea, aparecía la siguiente alarma. El tiempo medio de respuesta fue de aproximadamente cuatro segundos (Danchak, 1988, citado en Hollywell y Marshall, 1994).

8.3.2 Experimentación de U.S. NRC sobre sistemas de alarma en las instalaciones del Proyecto del Reactor Halden

La investigación experimental en las instalaciones del Proyecto Halden consistió en estudiar los efectos de la reducción y de la presentación de alarmas en la actuación del operador y de la planta (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1995, 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000). El objetivo global del programa era desarrollar directrices para la revisión, desde la aproximación de los factores humanos, de sistemas de alarma.

La descripción detallada del experimento, y sus principales resultados, está descrita en O'Hara, Brown, et al. (2000). Se emplearon tres variables independientes: procesamiento, disponibilidad y presentación de alarmas. El procesamiento de alarmas constó de tres niveles: reducción de alarmas al nivel de ruido, reducción de alarmas redundantes y sin reducción de alarmas. En cuanto a la disponibilidad de alarmas para centrar la atención del operador en las alarmas con un mayor significado operacional se consideraron dos tipos: la supresión y la asignación dinámica de prioridades. Existieron tres modos de presentación de alarmas, todos ellos en pantallas de visualización de datos: panel con ventanillas anunciadoras, una combinación de panel con ventanillas anunciadoras y lista de alarmas, y una combinación de lista de alarmas y alarmas integradas en los diagramas del proceso. Las variables independientes se combinaron para generar ocho condiciones experimentales. Además de variar las condiciones de las alarmas, se utilizaron dos tipos de escenarios de distinta complejidad, generando un total de dieciséis condiciones experimentales. Las medidas de

actuación fueron variables del proceso, actuación del operador, procesos cognitivos del operador (conciencia de la situación y carga) y comentarios y opiniones de los operadores.

O'Hara, Brown, et al. (2000) concluyeron que, en general, no se revelaron diferencias significativas entre los distintos sistemas de alarma y las condiciones experimentales. La tendencia más notable era una interacción de los efectos de la alarma con la complejidad del escenario. Los resultados globales del experimento indicaron que el número de alarmas presentadas a los operadores y el tipo de display de alarma no tuvieron impacto en la actuación humana durante las anomalías simuladas. Los operadores ejecutaron las tareas muy bien, todos los equipos fueron capaces de detectar las anomalías y manejarlas de manera efectiva. Los resultados llevaron a concluir que los efectos en el comportamiento fueron modestos porque los sistemas de alarma estaban bien diseñados, integrados en un entorno rico en información, y los operadores fueron capaces de cambiar sus estrategias de recogida de información para compensar las diferencias de los diseños (O'Hara, Brown, et al., 2000). Sin embargo, las estimaciones y las evaluaciones de los operadores sí resultaron más sensibles a las diferencias en el diseño de las alarmas (O'Hara, Brown, et al., 2000).

Los principales comentarios de los operadores en cuanto al procesamiento de alarmas fueron (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000):

- Mostraron una preferencia por la máxima reducción de alarmas, al facilitar la identificación y la comprensión de las alarmas importantes. Sin embargo, el procesamiento tuvo poco efecto en las medidas de actuación, incluyendo variables de planta, de las tareas y cognitivas (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000).

Los comentarios de los operadores indicaron claramente la dificultad para encontrar nuevas alarmas y ver donde encajaban en el cuadro global cuando el número de alarmas era elevado, por lo que O'Hara et al. (1998) esperaban que el análisis de la situación y la carga estuvieran afectados: en condiciones de procesamiento máximo de alarmas, un mejor análisis de la situación y una carga menor. Excepto varios efectos modestos, no sucedió. Este hallazgo es consistente con otros estudios, quedando abierta la pregunta de por qué la actuación, especialmente las medidas cognitivas, no resultaron afectadas significativamente. O'Hara et al. (1998) y O'Hara, Brown, et al. (2000) proporcionan, como posible explicación, que puede haberse producido alguna forma de *comportamiento compensatorio* cuando el número de alarmas era elevado. Los operadores han podido cambiar sus estrategias para afrontar situaciones de numerosas alarmas, dada la naturaleza avanzada de la sala de control de HAMMLAB.

En cuanto a la disponibilidad de las alarmas destacar (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000):

- Los resultados del estudio apoyaron la opción de suprimir las alarmas de menor prioridad, las cuales permanecen disponibles a demanda del operador, frente a la asignación dinámica de prioridad.

Los operadores indicaron que, aunque la priorización tiene la ventaja de que toda la información está disponible inmediatamente, con frecuencia existía un limitado uso de la información en la lista de baja prioridad, y les preocupaba que un operador pudiera resultar distraído por la lista o leyera la lista errónea. En lugar de eso, los operadores preferían mirar a la lista de alarmas suprimidas.

Los operadores no querían que las alarmas estuvieran completamente eliminadas (filtradas) del sistema, prefiriendo que permanecieran disponibles a demanda del operador, en primer lugar, debido a que existía cierta preocupación sobre el hecho de que la lógica de procesamiento pudiera no ser correcta al cien por cien y, en determinadas circunstancias, eliminar alarmas importantes. En segundo lugar, los operadores a veces usan las alarmas para otros objetivos, tales como información de estado para comprobar que los sucesos se desarrollaron de la forma esperada.

Observaron modestas diferencias entre los tipos de display en el comportamiento de la planta, del operador y cognitivo. Con respecto a la presentación de las alarmas, destacar los siguientes comentarios de los operadores (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000):

- Dedicación espacial: alarmas en ventanillas. En general, los operadores indicaron su preferencia por el modo de dedicación espacial en panel, al ser fácil encontrar e interpretar las alarmas importantes, son observables directamente. Ante una elevada cantidad de alarmas, los operadores también destacaron la relevancia de las ventanillas frente a otras formas de presentación. Un operador comentó que empleaba las pantallas de lista y de ventanillas, pero que, en escenarios difíciles con numerosas alarmas, sólo miró a las pantallas en ventanillas.

Sin embargo, aunque preferían la dedicación espacial, sus beneficios disminuyeron cuando el número de alarmas aumentó significativamente. En la condición de ventanillas, a los operadores a veces les resultaba difícil encontrar nuevas alarmas así como obtener una visión general de la situación de la planta ante una gran cantidad de alarmas. De hecho, esto se reflejó en la preferencia de los operadores por la condición de display mixto o en combinación, en donde el número de ventanillas de alarma era relativamente pequeño. Dadas estas consideraciones, los operadores indicaron que las alarmas clave deberían mostrarse en ventanillas.

Un problema asociado con las ventanillas era que no proporcionaron toda la información que los operadores consideraban necesaria para entender la anomalía, en concreto, el tiempo de ocurrencia, la secuencia, los puntos de tarado de la alarma y los valores del parámetro.

- Alarmas en listas de mensajes. Las listas de mensajes de alarmas resultaron muy útiles para obtener información detallada de la alarma. Un gran número de operadores indicaron que la secuencia de las alarmas era importante para entender qué inició un suceso y cómo progresó.

Sin embargo, hallaron como principal problema de las listas de alarmas el tiempo necesario para su lectura y la dificultad de uso, ante una gran cantidad de alarmas. Como resultado, los operadores no pudieron emplear efectivamente las listas ante un número elevado de alarmas y optaron por otras pantallas. Un problema significativo fue cuando las alarmas excedían una página, existiendo alarmas en páginas que no podían ver, ya que los operadores eran reticentes al desplazamiento de las páginas de alarmas (alarmas antiguas) y a menudo evitaban navegar en las listas de alarmas cuando la carga era elevada.

Una pantalla de alarma basada sólo en lista de mensajes no se incluyó en el estudio porque el formato se consideraba inaceptable, según los tipos de condiciones de procesamiento de alarma a evaluar. Investigaciones previas habían determinado que, a menos que hubiera una amplia reducción de las alarmas, una lista de mensajes resulta difícil de gestionar por los operadores. Esta decisión resultó apoyada por los resultados del estudio. Los operadores no consideraron útil la lista en condiciones de elevada cantidad de alarmas y la abandonaron en favor de pantallas primarias de alarmas.

- Alarmas integradas en pantallas del proceso. La integración de alarmas en los displays de visión general del proceso y en sinópticos detallados del proceso fue considerada efectiva, con muchas ventajas similares a las ventanillas, esto es, adecuada para la evaluación rápida de la anomalía y, cuando el número de alarmas era elevado, preferían así mismo estos displays a las listas de mensajes. La integración de las alarmas en los displays del proceso hizo más fácil entender la relación entre las alarmas y la anomalía del proceso (sistemas y componentes) que las causaba.

El problema con el display integrado es que algunas alarmas no se muestran en las pantallas, ya que están ocultas en formatos del proceso de nivel inferior. Además, dado el modo en que las alarmas fueron implementadas en el estudio, no podían determinar si un parámetro de alarma era alto o bajo y en qué dirección iba. Sin embargo, los autores argumentan que esta limitación podría corregirse fácilmente.

Uno de los resultados más significativos fueron las interacciones: las características del sistema de alarma frecuentemente reflejaban interacciones con otras características del sistema y con otros factores en el análisis de las medidas de actuación (O'Hara et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000):

- Los comentarios de los operadores sobre los displays de alarmas frecuentemente reflejaban interacciones con el procesamiento de alarmas. Por ejemplo, no resultaría adecuado integrar alarmas en los formatos del proceso si no se dispone de procesamiento de las alarmas, pero sí en caso contrario. Semejantemente, las listas de mensajes se juzgaron muy útiles cuando se empleaba un alto nivel de procesamiento de alarmas.
- Los efectos de la complejidad del escenario también se manifestaron a través de interacciones con las características del sistema de alarma. Los operadores indicaron que el valor del display depende del tipo de anomalía y de la fase de la anomalía. En cuanto al tipo de anomalía, la lista de mensajes resultaba adecuada cuando la anomalía era simple y había pocas alarmas, sin embargo, la pantalla de ventanillas era mejor cuando había mayor cantidad de alarmas. En relación con la fase de la anomalía, al principio resulta más importante ver qué alarmas están activas y en qué lugar de la planta, lo que fue satisfecho de forma más adecuada por la pantalla de ventanillas. En las últimas fases de una anomalía, la secuencia de la alarma resulta relevante, prefiriendo la información detallada proporcionada por los mensajes de alarma.

O'Hara et al. (1998) y O'Hara, Brown, et al. (2000) concluyeron que las interacciones reflejan que la información de alarmas se emplea, por los operadores, de diversas formas, ya que los sistemas de alarma sirven para muchos propósitos en las centrales nucleares: para alertar de una anomalía, para el análisis de la situación (relación entre alarmas, componentes, sistemas y funciones), para la planificación de la respuesta (comprobar la disponibilidad de componentes y sistemas) y para el análisis posterior de la anomalía.

Para O'Hara, Brown, et al. (2000), los resultados del estudio sugieren que, para lograr los diferentes roles, la presentación de alarmas más efectiva podría incluir tres elementos: ventanillas (display SDCV), listas de mensajes y alarmas integradas en las pantallas de monitorización del proceso. Un aspecto importante a considerar es la coordinación de las alarmas en los tres tipos de pantallas de alarmas, con el objeto de facilitar una transición fácil y rápida entre ellas, y de evitar abrumar a los operadores con información de alarmas (O'Hara, Brown, et al., 2000). Los roles se cubrirían del siguiente modo:

- Las ventanillas ofrecen las funciones de alerta y de información general, por lo que pueden mostrar un pequeño conjunto de alarmas importantes. Su ventaja es que están siempre presentes y en una única localización fija para los parámetros clave, el equipo, el sistema y el estado de la función.
- Las alarmas integradas en los formatos del proceso proporcionan un estatus similar de alto nivel, pero pueden resultar más adecuadas para la evaluación de la situación, ya que están en pantallas que muestran las relaciones entre los equipos, los sistemas y las funciones de la planta. Las alarmas integradas, sin embargo, no presentan la visión general proporcionada por las pantallas de ventanillas, ya que muchas alarmas están ocultas.
- Ni las ventanillas ni las pantallas integradas proporcionan información detallada acerca de las alarmas, lo que está disponible en las listas de mensajes. El mensaje puede incluir datos como el tiempo, la secuencia, el punto de tarado y los valores de los parámetros que los operadores necesitan para analizar una anomalía (sobre todo en sus etapas temprana y tardía).

En cuanto al rol del sistema de alarma, Brown et al. (2000) concluyen que a medida que avanza la tecnología, la información se integra y, como consecuencia, la relación entre los sistemas de alarma y los sistemas de visualización de la planta se difumina. Dentro del sistema de alarma, los operadores pueden obtener procedimientos, diagramas sinópticos y pantallas relacionadas y los controles. Por lo que su diseño como un sistema integrado ha aumentado su funcionalidad y ha hecho que sea más difícil definir con precisión el rol del sistema de alarma de forma independiente de otros recursos de la interfaz de la sala de control (Brown et al., 2000).

8.3.3 Investigación sobre el sistema de alarma AWARE

Un segundo estudio de U.S. NRC sobre los sistemas de alarma evaluó el impacto de la introducción de tecnologías avanzadas de HSI en la sala de control de una planta de energía nuclear (Roth y O'Hara, 2002). Incluye un sistema de alarma avanzado (sistema AWARE de Westinghouse), procedimientos computarizados y un sistema de visualización de la información de planta avanzado basado en gráficos. El estudio exploró el efecto de los nuevos sistemas en el funcionamiento cognitivo de los miembros individuales del equipo y la estructura y el funcionamiento del turno como un equipo. Se observaron cinco equipos de operadores profesionales en sesiones de formación en un simulador de alcance total y, además, se entrevistó a operadores, a otro personal de la central y a proveedores.

Los principales resultados de la investigación en cuanto al procesamiento, a la supresión y a la presentación de alarmas se resumen a continuación (Brown et al., 2000; Roth y O'Hara, 2002):

- Procesamiento y reducción de alarmas. Entre las características del sistema de alarma se había incluido proporcionar alertas cuando el sistema automático de seguridad no actuaba de la forma esperada o cuando un suceso no se desarrollaba del modo previsto. Los operadores comentaron en repetidas ocasiones que el apoyo para la detección de sucesos inesperados fue un aspecto destacable del sistema avanzado, dada la utilidad de la ayuda en circunstancias fuera de lo común. Sin embargo, al mismo tiempo, recomendaron reducir otros tipos de presentación de alarma, tales como condiciones de estado o esperadas.

Los operadores informaron que podría reducirse el número de alarmas. El estudio reforzó la necesidad de una reducción significativa de las alarmas durante anomalías de la planta así como la dificultad de lograrlo.

- Priorización y disponibilidad de alarmas. El diseño del sistema de alarma conservó un cierto grado de dedicación espacial aprovechando la flexibilidad que ofrece el uso de texto generado por ordenador. El panel principal de visualización de alarma constaba de 254 ventanas de mensajes. Los mensajes de alarma se agruparon y se asignaron a las ventanas por el modo funcional de la planta. Aunque sólo un mensaje de alarma se podía mostrar en una ventana a la vez, podría estar activo simultáneamente más de un mensaje de alarma asociado a esa ventana. En ese caso, un esquema de priorización determinaba qué mensaje mostrar en la ventana. Si había mensajes en cola, aparecía un símbolo en la ventana de alarmas para alertar a los operadores. Se podía acceder desde una consola de PVD a los mensajes de alarma de prioridad más baja. En algunos casos, cuando había muchos mensajes en cola, los operadores expresaron que no tenían tiempo para mirarlos. Consecuentemente, los operadores podrían no disponer de tiempo para consultar alarmas de menor prioridad en pantallas secundarias. Pueden revisarlas en casos especiales, o posteriormente cuando la carga de trabajo sea menor, pero, en general, los operadores se basaron en el esquema de asignación de prioridades de las alarmas. Esto incrementa la importancia de contar con un esquema robusto de priorización de alarmas, que sea ampliamente aplicable en diferentes contextos. También demuestra la importancia de minimizar las demandas asociadas a acceder a información en pantallas secundarias.
- Presentación de alarmas. Además del sistema avanzado, los operadores disponían de otros dos sistemas de alarma. Uno de ellos era el sistema convencional de ventanas de alarmas en panel, organizado en matrices de funciones y de sistemas de la planta. El otro era una pantalla de lista de mensajes de alarmas en PVD, cronológicamente organizada, que contenía los puntos de ajuste de la alarma asociados al parámetro de planta.

Una característica clave del sistema avanzado fue que la pantalla se organizó funcionalmente. Los operadores encontraron que la organización funcional del sistema era muy útil y mejoraba su comprensión del estado de la planta. El objetivo de diseño del sistema avanzado estaba en utilizar la posición física de la pantalla de alarmas para permitir a los operadores identificar la naturaleza de la alarma, sin tener que leer el texto. Los comentarios iniciales de los operadores indicaron que necesitaban demasiado tiempo para leer el mensaje de alarma, con el fin de comprender la naturaleza de la alerta; posiblemente mejore con entrenamiento y experiencia.

Durante operación normal, observaron que los operadores confiaban en la lista cronológica del sistema de alarma para obtener signos tempranos de funcionamiento incorrecto de equipos de menor importancia. En caso de emergencia, cuando se genera una gran cantidad de alarmas, la organización de la lista cronológica resultó ineficaz, ya que los operadores no tenían suficiente tiempo para leer los mensajes de alarma y no disponían de dedicación espacial para inferir el contenido del mensaje de alarma. Prefirieron el sistema avanzado, frente al sistema convencional de ventanas en panel y a la lista, que organizaba la información de forma funcional y mostraba las alarmas en paralelo en paneles distribuidos físicamente.

Los autores destacan que los resultados no implican que las listas cronológicas sean el medio más apropiado para mostrar la información en operación normal; es probable que esta preferencia sea debida al hecho de que el sistema avanzado no incluía alarmas específicas relevantes para operación normal. Más bien, se pone de manifiesto que la información requerida por los operadores y, por tanto, el uso de los sistemas de alarma, es muy diferentes en condiciones de operación normal y de emergencia, y que estas diferencias se deben considerar de manera explícita en el diseño y en la evaluación de estos sistemas. Los

resultados indican que múltiples formatos de presentación de información son necesarios para satisfacer las necesidades de información del operador. Es decir, cada opción tiene ventajas únicas y es útil en determinadas circunstancias.

También encontraron que los operadores a menudo son reacios a participar en la gestión de la interfaz del sistema de alarma.

Por otro lado, los operadores no solían eliminar las tendencias con el fin de acceder a información adicional de alarma. Las pantallas de tendencias fueron mencionadas por todos los equipos como las pantallas más valiosas durante operación normal y en emergencia. Las pantallas de tendencias apoyan una amplia conciencia de la situación ya que los operadores pueden, de un vistazo, detectar si los parámetros permanecen constantes o cambian, la dirección y la velocidad del cambio, cuando se aproximan al límite de alarma.

8.3.4 Resumen de la investigación sobre sistemas de alarma de U.S. NRC

Roth y O'Hara (2002) concluyen que los dos estudios patrocinados por U.S. NRC (O'Hara, Brown, et al.; Roth y O'Hara, 2002) consideraron diferentes objetivos, diferentes métodos de investigación (observación y entrevistas frente a experimento controlado) y un diseño distinto del sistema de alarma. A pesar de estas diferencias, las lecciones aprendidas de los dos estudios son sorprendentemente similares, especialmente con respecto a lo siguiente (Roth y O'Hara, 2002):

- Existieron dificultades para lograr una reducción significativa de alarmas.
- La dedicación espacial es importante.
- El sistema de mensajes tienen limitaciones. A diferencia de las ventanillas, que pueden ser reconocidas rápidamente a partir del conocimiento de la localización espacial que tiene el operador, los mensajes de alarma tienen que ser leídos individualmente, lo que puede crear una gran carga cuando hay numerosas alarmas.
- Los operadores se mostraron reacios a la gestión de la interfaz de las alarmas en situaciones de elevada carga de trabajo.
- Los requisitos del sistema de alarma eran diferentes en condición normal, de anomalía y con posterioridad a la anomalía. Los resultados de ambos estudios sugieren que se puede necesitar múltiples tipos de pantallas de alarma para satisfacer los diversos usos que realiza el operador del sistema de alarma.

8.4 INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA PATROCINADA POR EPRI

MPR Associates (1985) realizó para EPRI una encuesta a centrales nucleares de Estados Unidos, que disponían en la sala de control de anunciadores en paneles y de sistema de alarma computarizado, para identificar mejoras potenciales de las alarmas. Los resultados de MPR Associates (1985) indican que los operadores preferían el uso de los sistemas anunciadores convencionales durante situaciones de anomalías en la planta, cuando el número de alarmas es relativamente elevado. También consideraron aceptables los sistemas avanzados durante operación normal, donde el número de alarmas es bajo. Por último, recomendaron la utilización de sistemas avanzados para reducir la cantidad de alarmas.

Posteriormente, el Instituto de Investigación EPRI llevó a cabo una serie de pruebas que examinaron el modo de presentación de alarmas en ventanillas en panel frente a pantallas de visualización (Fink et al., 1992; MPR Associates, 1988). El estudio investigó tres sistemas alternativos

de presentación de alarma, incluyendo alarmas en ventanillas en paneles convencionales, listas en pantalla de visualización de alarmas, una combinación de alarmas en ventanillas en paneles y alarmas en pantallas, con un total de seis formas de presentación de alarmas. En la presentación convencional en paneles, una condición representaba fielmente la existente en la planta de referencia, dos condiciones estaban agrupadas y etiquetadas por el sistema o por la función de la planta. En la presentación avanzada en pantallas de ordenador, una condición incluía dos pantallas con mensajes de texto de alarma, otra condición constaba de información sobre el sistema o función de la planta en forma gráfica junto con lista de mensajes de alarma y, la tercera condición, era una lista de mensajes de alarma diseñada para ser utilizada complementariamente a los anunciadores convencionales, con el propósito de destacar las alarmas menos usuales. Quince operadores participaron en las pruebas en el simulador. Las medidas de actuación incluyeron la velocidad y la precisión con la que los operadores extrajeron la información del sistema de alarma y las opiniones de los operadores sobre la facilidad de uso y otros parámetros subjetivos. Los resultados mostraron que la agrupación de las alarmas por sistema y función mejoró el comportamiento, un hallazgo que era consistente con un estudio anterior de EPRI (Fink, 1984). El sistema convencional permitió a los operadores obtener información con mayor rapidez y facilidad que lo hizo la presentación en pantallas de ordenador. La presentación en pantallas se empleó mejor como complementaria a la visualización de alarmas en ventanillas, para poner de relieve las alarmas que no eran usuales en un determinado transitorio.

Los principales resultados del estudio de Fink et al. (1992) son:

- Las alarmas son útiles, incluso en una avalancha de alarmas, durante un fallo de funcionamiento importante. El sistema anunciador presenta una amplia cantidad de información de sistemas y de componentes de la planta, gran parte de la cual puede ser asimilada con precisión por el operador.
- Las diferentes características del sistema de alarma afectan a la capacidad del operador para asimilar la información de alarmas, y las diferencias resultantes en la actuación entre los sistemas de alarma se pueden medir cuantitativamente. Encontraron, por ejemplo, que las alarmas agrupadas por sistemas y funciones mejoran el rendimiento del sistema de alarma, tanto en los paneles anunciadores como en las pantallas de visualización.
- Los paneles anunciadores convencionales presentan ventajas medibles en comparación con una lista de mensajes de alarma en pantalla de visualización:
 1. El tiempo requerido para obtener información de alarma, atribuido a: la posición fija del anunciador y el agrupamiento de las alarmas permite que el operador concentre la búsqueda dentro de un área local; el panel anunciador proporciona información directa sobre las alarmas que no están en estado activo (o en alarma), mientras que esto no sucede en la lista de alarmas en pantalla, puesto que el operador necesita escanear toda la lista para determinar si un parámetro está o no en alarma.
 2. La exactitud en la asimilación de las alarmas. Cuando hay pocas alarmas la diferencia es insignificante, pero con una elevada tasa de nuevas alarmas, típica de una anomalía importante, esta diferencia se vuelve mucho mayor.
- Las alarmas en pantalla pueden ser eficaces para destacar las alarmas no usuales, es decir, aquellas no relacionadas con la anomalía principal pero que son importantes y requieren la acción del operador, y suprimir las alarmas normales.
- Hay un conjunto relativamente pequeño de alarmas clave que los operadores tienden a utilizar para diagnosticar una anomalía.

Los principales resultados en cuanto a los mensajes de alarma en posición fija frente a variable son (Fink et al., 1992):

- Los mensajes de alarma en las ventanillas de los paneles anunciadores ocupan un lugar fijo, con el que se familiarizan los operadores, aumentando con el entrenamiento. En las tareas de búsqueda de alarmas individuales y de grupo, las ventanillas anunciadoras proporcionan una clara ventaja frente a las listas de alarma. Por otro lado, las ventanillas proporcionan inmediatamente información sobre las alarmas que no están activas, algo que la lista no suministra.
- Los mensajes de alarma en pantalla de visualización pueden aparecer en casi cualquier lugar de la pantalla, en función de la cronología de las alarmas y del método utilizado para la asignación del espacio en la pantalla a los diferentes grupos de alarma, por ejemplo, por prioridad o por sistema. Por otro lado, la lista de alarmas resultó muy difícil de seguir durante un transitorio rápido, no existían patrones para apoyar el reconocimiento, ni la imagen mental del operador.
- Recomiendan la presentación de alarmas en la sala de control en una pantalla bien organizada y de posición fija, ya que proporciona información única y eficaz para el operador, tanto a nivel de componente como de sistema, en particular para información de la alarma sobre la que hay que actuar a corto plazo.

Los principales resultados en cuanto a la presentación en paralelo frente a en serie son que mientras que las ventanillas anunciadoras disponen de un amplio espacio en la sala de control, permitiendo la presentación simultánea de todas las alarmas, las alarmas en pantallas de visualización utilizan menos espacio, lo que requiere que parte de la información de alarma se almacene en páginas posteriores y que sólo se pueda mostrar mediante la sustitución de otra información de alarma (Fink et al., 1992).

Los principales resultados en cuanto a una presentación diseminada frente a agrupada son (Fink et al., 1992):

- Las ventanillas se distribuyen en paneles, ubicando las alarmas cerca de los controles e indicadores relacionados, en cambio las pantallas de visualización agrupan la información en un único lugar. No obstante, el tamaño estándar de la pantalla de visualización podría no ser compatible con las grandes áreas de las estaciones de trabajo asignadas a los operadores en la sala de control de la mayoría de las centrales eléctricas.
- La presentación agrupada de las alarmas puede satisfacer las necesidades de información del supervisor y del jefe de turno de la sala de control, siendo especialmente útil para estos miembros del equipo de operación. Puede hacer más legible la información detallada de alarma de las ventanillas en los paneles y apoyar sus roles de gestión e interpretación, proporcionando información procesada de la alarma.

Esto les lleva a concluir que las características de ambas tecnologías, las alarmas en ventanillas y en pantallas de visualización, desempeñan un papel importante para apoyar al equipo de operación de una sala de control de una central nuclear (Fink et al., 1992).

La presentación de las alarmas juega un efecto significativo en el éxito del sistema de alarma para la transferencia de información al operador. Las conclusiones del experimento han sido empleadas para proporcionar directrices sobre cómo asignar alarmas a las diferentes formas de

presentar información y cómo usar las pantallas, así como para ampliar las directrices sobre el diseño y el uso de pantallas de visualización (MPR Associates, 1990).

8.5 INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA DESARROLLADA POR STANTON Y COLABORADORES

El profesor Neville Stanton en 1992 desarrolló su tesis doctoral en aspectos de factores humanos de sistemas de alarma en tareas de control con supervisión humana, empleando un enfoque centrado en la persona para la evaluación, la medición y el análisis de la situación. Los requisitos de comportamiento humano en los sistemas de alarma, en los ámbitos de la generación de energía, la fabricación y los cuidados coronarios o intensivos, fueron investigados a través de entrevistas, cuestionarios, observación y experimentos controlados. Stanton (1992) encontró que, a menudo, la mayoría de los sistemas de alarma presentan graves deficiencias en cuanto a los aspectos de factores humanos.

Stanton (1992, 1994a) y Stanton et al. (1992) propusieron un marco de investigación relativo a los medios de presentación de la alarma, denominado Actividades Iniciadas por la Alarma (*Alarm Initiated Activities* o AIA), que constaba de seis etapas principales o fases de afrontamiento de las alarmas: observar, aceptar, analizar, investigar, corregir y monitorizar. Posteriormente, añadieron una séptima etapa, denominada restaurar (figura 8-1) (Stanton, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998).

La actividad en sala de control puede dividirse en rutinaria e incidental. El modelo muestra la diferencia entre incidente con alarmas: rutinario (líneas lisas) y crítico (líneas punteadas), existiendo actividades comunes en ambos tipos de incidentes, pero los incidentes críticos requieren investigación más detallada de alto nivel cognitivo (Stanton, 1992, 1994a). Las actividades de tratamiento de incidentes consumen sólo una pequeña parte del tiempo del operador, aproximadamente el 10% (Baber, 1990, citado en Stanton, 1994a; Reinartz y Reinartz, 1989, citado en Stanton, 1992, 1994a, 1996a, en Stanton y Baber, 1995), constituyendo la parte más importante de la tarea (Stanton, 1994a).

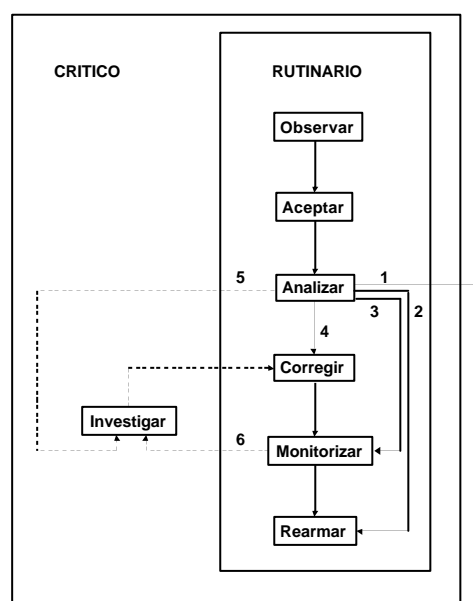


Figura 8-1. Modelo AIA de Stanton (Stanton, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998).

En breve, el modelo de AIA de Stanton (Stanton, 1994a, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998; Stanton et al., 1992) refiere que en la gestión de alarmas, los operadores observan la aparición de una alarma, aceptan la alarma y realizan un análisis rápido sobre si debe ser ignorada (camino 1), restablecida (camino 2), monitorizada (camino 3), tratada superficialmente (camino 4) o requiere una investigación posterior (camino 5). Entonces, incluso si consideran que puede requerir más investigación, pueden intentar corregirla y cancelarla (camino 4) para ver qué sucede. Si no se puede eliminar, el operador puede entrar en un modo de investigación para buscar la causa (camino 6). El operador monitoriza el estado de la planta tras llevar a cabo sus acciones correctivas y, en última instancia, restaura (o restablece) la alarma.

Para cada una de las siete etapas del modelo AIA identificaron un total de 24 comportamientos relacionados (Stanton, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995):

- Observar: extracción activa y recepción pasiva.
- Aceptar: aceptar individualmente, aceptar en grupo y aceptar todas.
- Analizar: ignorar, restaurar, monitorizar, responder e investigar la alarma.
- Investigar: identificar el fallo, sensación del proceso (frente a conocimiento), deducir la causa, procedimientos y sistema experto.
- Corregir: mitigar las consecuencias, romper la cadena de propagación (aislar), terminar la fuente del fallo, limpiar las secuelas (ha pasado el fallo, pero los efectos aún persisten).
- Monitorizar: muestro intermitente y muestreo continuo.
- Rearmar: rearmar individualmente, rearmar en grupo y rearmar todas.

En la tabla 8-5 se expone una breve descripción de cada una de las actividades del modelo AIA (Stanton, 1992, 1994a, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Booth, 1990; Stanton y Stammers, 1998; Stanton et al., 1992).

Tabla 8-5. Descripción de las Actividades Iniciadas por la Alarma (AIA) del Modelo de Stanton et al.

AIA	Descripción de las Actividades Iniciadas por la Alarma (AIA)
Observar	El modo observar se caracteriza por la detección inicial de las condiciones anómalas de planta (Stanton, 1992, 1994a). La detección de una alarma por el operador no garantiza que la respuesta será adecuada (Stanton y Baber, 1995; Stanton y Booth, 1990). La alarma atraerá la atención del operador (recepción pasiva) y el operador anticipará o buscará la alarma (extracción activa) (Stanton, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998). La ironía de atraer la atención del operador a una nueva alarma es que implica la distracción del operador de otros aspectos de la tarea, que puede interferir con una operación importante. Por tanto, el sistema de alarma necesita mostrar que existe un problema que hay que tratar, en vez de forzar al operador a afrontarlo, a no ser que la alarma requiera acción inmediata y posibilite que el operador distinga entre alarmas relacionadas con sucesos distintos (Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 1992).
Aceptar	Al aceptar una alarma, ésta se reconoce, cambiando el estado visual y audible (Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995). Los operadores no siempre aceptan las alarmas cuando se anuncian, puesto que se origina una pérdida de información temporal, que diferencia nuevas alarmas de las existentes (Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995).
Analizar	El análisis de la alarma se lleva a cabo dentro del contexto de la tarea que se va a realizar y la dinámica del sistema (Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995). La tarea del operador consiste en decidir qué hacer a continuación, en buscar información relevante para tomar decisiones (Stanton, 1992, 1994a). Los diferentes modos de presentar alarmas (anunciadores, listas y sinópticos) pueden facilitar determinados aspectos de las tareas del operador, por ejemplo, indicar en qué parte de la planta está la variable que causó la alarma; las implicaciones de la alarma; la urgencia de la alarma, y qué debería hacerse a continuación. Las listas de alarmas muestran el orden en que la alarma

AIA	Descripción de las Actividades Iniciadas por la Alarma (AIA)
	sucedío, las alarmas en displays mímicos trazan la representación espacial de la planta, y las alarmas anunciadoras proporcionan la posibilidad de reconocimiento de patrones (Stanton, 1994a).
Investigar	La fase de investigar se caracteriza por la búsqueda de la causa subyacente a la alarma, con la intención de gestionar el fallo (Stanton, 1992, 1994a). En la investigación del fallo hay al menos cinco caminos diferentes, que no son mutuamente excluyentes (Stanton y Baber, 1995).
Corregir	El fallo ha sido identificado o diagnosticado, por lo que hay que seleccionar el curso de acción apropiado (Stanton y Baber, 1995). Las acciones correctoras resultan de modos cognitivos previos en respuesta a la alarma (Stanton, 1994a; Stanton y Baber, 1995). La presencia de la alarma por sí misma no indica directamente qué curso de acción se requiere. Una alarma sólo indica que se ha pasado un determinado umbral (Stanton, 1994a; Stanton y Baber, 1995; Stanton et al., 1992).
Monitorizar	Es muy similar a la etapa de analizar, ya que puede implicar una búsqueda de información y la tarea de recuperación. Esencialmente, se supone que este modo transmite una evaluación del efecto del proceso (Stanton, 1992; Stanton y Baber, 1995). La monitorización no es continua, se caracteriza por muestreo intermitente (Stanton, 1992, 1994a; Stanton y Baber, 1995).
Rearmar	El operador reconoce que la condición iniciadora ya no está presente. Se extingue la alarma, volviendo al estado de inactividad (Stanton y Baber, 1995).

Stanton (1992, 1994a) propone que el sistema de alarma debería apoyar la AIA. La observación puede llamar la atención de los operadores, pero no a expensas de actividades más importantes. La aceptación puede permitir a los operadores ver qué alarmas han sido aceptadas. El análisis puede indicar a los operadores qué habría que hacer a continuación. La investigación dirige a los operadores a elegir una estrategia apropiada. La corrección puede estar apoyada a través de la compatibilidad entre la tarea y la respuesta. La monitorización proporciona retroalimentación operacional. El diseño de la información de alarmas necesita reflejar la AIA, porque el objetivo de una alarma no debería ser “impactar a los operadores para actuar”, sino llevarles a actuar del modo correcto.

El desarrollo de la taxonomía y del modelo de gestión de alarmas sitúa el énfasis en los formatos de diseño requeridos para apoyar las actividades iniciadas por las alarmas. Los requisitos humanos para cada una de las categorías de la taxonomía de alarma pueden ser diferentes, y la información que apoya una determinada etapa del modelo AIA de tratamiento de alarmas puede interferir con otra de las etapas, por lo que en algunos casos estarían en conflicto; la alarma en la sala de control no es un hecho aislado que ocurre independientemente, sino que está relacionada, es dependiente del contexto y forma parte de un sistema de información más amplio (Stanton, 1992, 1994a, 1995, 1996a; Stanton y Baber, 1995). Se añade a esta dificultad, la existencia de diferencias individuales en los operadores y que pueden existir múltiples caminos de éxito (Stanton, 1994a). Por tanto, resulta necesario un sistema flexible de presentación de información.

Stanton y colaboradores han comparado diferentes medios de presentación de la información, entre los que destacan sistemas anunciadores, mensajes de texto y sinópticos. La hipótesis formulada es que el formato en que se presenta la información de alarma determinará el éxito de la tarea de gestión de alarmas, por lo tanto, la propuesta es ajustar los formatos a las tareas. Cada método de presentar información de alarma dispone de cualidades inherentes que apoyan diferentes actividades:

- En las pantallas de anunciadores es probable que fallos frecuentes y familiares sean fácilmente identificables. Sin embargo, la pantalla no parece ser propicia para ayudar al operador a descubrir fallos poco frecuentes y nuevos, debido a la forma en que está integrada la

información (Stanton y Stammers, 1998). Las alarmas en anunciadores ofrecen el reconocimiento de patrones (Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998).

- En las pantallas de alarma basadas en texto los operadores de sala de control tienen primero que identificar las alarmas vinculadas a los sucesos y luego determinar el significado de la secuencia de los acontecimientos, esto es, interpretar el código escrito en una referencia espacial y relacionar las distintas alarmas entre sí con el fin de determinar la naturaleza del problema (Stanton y Stammers, 1998). Las listas de alarma indican el orden en que se produjo la alarma (Stanton y Baber, 1995; Stanton y Stammers, 1998; Stanton et al., 1992).
- Las pantallas de alarma con sinópticos mantienen a los operadores en contacto con la disposición física de la planta. Los operadores pueden ver la propagación del fallo a través de la planta y remontar de nuevo a la fuente del fallo (Stanton y Stammers, 1998).

Como conclusión, Stanton (1991, 1992, 1994a) y Stanton y Stammers (1998) recomiendan ajustar los formatos a las tareas del siguiente modo:

- Los anunciadores para tareas que requieren identificar patrones de alarmas.
- Los mensajes de texto para tareas que requieren la presentación secuencial de la información, esto es, de un razonamiento basado en el tiempo.
- Las alarmas incluidas en sinópticos para tareas que requieren una referencia (localización) espacial.

Stanton (1995, 1996a) y Stanton y Baber (1995) cuestionaron el uso exclusivo de pantallas de alarma basadas en texto. Stanton (1995, 1996a) y Stanton y Baber (1995) concluyeron que la *extracción activa* de información estaría apoyada, más adecuadamente, por una presentación visual permanente. Esto daría lugar a la integración de la información de alarma, al abandono de la tendencia de depender exclusivamente de pantallas de alarma basadas en texto y a la disposición de pantallas paralelas en lugar de pantallas secuenciales. Estos cambios podrían apoyar los heurísticos del operador en todo momento, estando la información disponible sin necesidad de que el operador lleve a cabo extensas actividades de búsqueda.

Stanton (1992, 1994a) y Stanton et al. (1992) concluyen que el medio óptimo de presentar información estará determinado, en gran parte, por lo requerido al operador. Stanton (1992), Stanton y Baber (1995) y Stanton et al. (1992) recomiendan emplear las pantallas de visualización de datos como un medio de apoyo a la información proporcionada en los anunciadores, ya que éstos últimos proporcionan una representación de todo el sistema, mientras que las primeras sólo pueden proporcionar una representación modular de componentes individuales. Proporcionar ambos medios de presentación de información permite obtener una visión general en los paneles anunciadores y un medio para investigar en las pantallas de visualización de datos (Stanton et al., 1992). Más aún, Stanton y Baber (1995) cuestionan y alegan fuertemente contra el uso de los sistemas de pantalla de texto, sobre la base de su modelo psicológico de gestión humana de las alarmas y de objeciones por parte de operadores de sala de control, por lo que, como consecuencia, proponen que pantallas en paralelo, en lugar de pantallas secuenciales, optimizarían la detección de alarmas. Una cita de Stanton y Baber (1995) ilustra una observación realizada por operadores de sala de control:

“El uso de un ordenador para visualizar las alarmas en forma escrita es una forma fácil de mostrar una gran cantidad de alarmas, pero puede resultar confuso o inútil” (Stanton y Baber, 1995, p 2415).

8.6 EVALUACIÓN DE SISTEMA DE ALARMA EN UNA SALA AVANZADA DE MATSUSHITA ET AL.

Matsushita et al. (1988) evaluaron un prototipo de diseño de una sala de control avanzada PWR en un simulador. El sistema de visualización de alarmas estaba basado en pantallas de visualización.

Los operadores consideraron que el método de pantallas era eficaz cuando se anunciaron pocas alarmas, pero cuando se presentaron muchas alarmas al mismo tiempo, como en las condiciones de transitorios o de accidente, resultó más difícil para los operadores la identificación de problemas que con el sistema convencional de paneles anunciadores (Matsushita et al., 1988). Esto les llevó a implementar en el diseño de la sala de control dos sistemas de alarma: un sistema convencional y un sistema basado en pantallas.

8.7 ESTUDIOS DE CAMPO SOBRE MONITORIZACIÓN EN OPERACIÓN NORMAL DE VICENTE ET AL.

Mumaw et al. (2000), Roth, Mumaw, Vicente y Burns (1997), Vicente (2007), Vicente y Burns (1995, 1996, 1997) y Vicente et al. (1997, 2001, 2004) han llevado a cabo un programa de investigación para estudiar cómo monitorizan, en operación normal, los operadores de la sala de control. Para ello, han realizado una serie de estudios de campo cognitivos en tres centrales nucleares canadienses, Pickering B, Bruce B y Darlington, en condiciones de operación normal, aplicando técnicas de observación y entrevistas. En total observaron a 38 operadores durante aproximadamente 288 horas (Vicente et al., 2004). El énfasis se situó en los procesos cognitivos y colaborativos que contribuyeron a monitorizar, incorporando teorías cognitivas para el diseño y el análisis de las observaciones. El resultado fue la caracterización de las actividades de monitorización del operador durante operación normal, las fuentes de información empleadas para monitorizar, qué dificulta la monitorización y las estrategias que desarrollan los operadores para facilitar la monitorización.

La comprensión que tienen los operadores del contexto debe ser actualizada continuamente si ha de ser exacta, lo que origina que la monitorización sea una actividad cognitiva retardadora, incluso en operación normal (Vicente et al., 2001). La monitorización durante operación normal es una tarea compleja, cognitivamente demandante, que se caracteriza por una solución activa de problemas en vez de por una vigilancia pasiva (Mumaw et al., 2000; Roth et al., 1997; Vicente et al., 2004).

La monitorización está basada en procesos dirigidos por datos y en procesos dirigidos por conocimiento⁴¹ (Mumaw et al., 2000; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 2001). Vicente y Burns (1995) observaron dos formas diferentes de monitorizar: activa y dirigida. En primer lugar, los operadores proactivamente monitorizaron una o más variables estrechamente en función del contexto, de la situación actual de la planta. En segundo lugar, hay un subconjunto de variables que los operadores supervisan regularmente de forma proactiva, incluso en ausencia de una alarma; esta estrategia parece estar basada en una priorización de arriba hacia abajo de las variables que son más propensas a mostrar cambios significativos. Esto es, las personas obtienen información del entorno de dos formas principales, realizando una búsqueda activa (la información que necesitan para lo que están

⁴¹ El procesamiento cognitivo en tareas dinámicas complejas implica el procesamiento guiado por conocimiento (*top-down*) y el procesamiento guiado por datos (*bottom-up*) (Bainbridge, 1997).

pensando en ese momento) y una búsqueda reactiva (algo del entorno llama la atención) (Bainbridge, 1997; Jönsson y Osvalder, 2005; Niwa y Hollnagel, 2001; Osvalder y Alm, 2011; Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009). Además, la monitorización no es la única actividad que deben realizar los operadores, sino que se compagina con otras responsabilidades de gestión de las tareas diarias para generar energía (Mumaw et al., 2000). Los operadores toman decisiones estratégicas en la asignación de sus recursos limitados para monitorizar (Mumaw et al., 2000).

Las fuentes de información que los operadores emplean para la monitorización incluyen un conjunto amplio y diverso, no son sólo los parámetros y las alarmas de sala de control, destacando (Mumaw et al., 2000; Vicente, 2007; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 2001, 2004):

- Cambios de turno. Cuando el operador inicia su actividad laboral en la sala de control, emplea entre 15 y 30 minutos con el operador al que releva en el cambio de turno. La actividad inicial consiste en revisar el estado de los parámetros clave, cualquier alarma no usual, los trabajos finalizados y pendientes, los parámetros que necesitan ser monitorizados más frecuentemente, y qué rondistas o técnicos están trabajando sobre qué componentes. Luego revisan qué test están programados para el turno y el diario del plan de trabajo (mantenimientos a realizar, etc.). También comprueban los resúmenes del ordenador y las alarmas, e intentan entender, para cada alarma, el motivo de estar activa. Asimismo realizan un procedimiento formal de chequeo del panel para determinar si determinados parámetros importantes se encuentran en un estado aceptable. Algunos operadores llevaron a cabo un *walk-through*⁴² informal (revisión sistemática de los indicadores) del panel antes de empezar el turno.
- Registros. Es un registro cronológico, escrito a mano, de las actividades significativas, no necesariamente anómalas, que han ocurrido durante un turno. El registro proporciona información sobre el estado reciente de la unidad, por ejemplo, qué componentes no funcionan, cuales se están reparando.
- Pruebas. Habitualmente están programadas un número de pruebas rutinarias de equipos, con el objeto de asegurar que los sistemas de reserva y de seguridad se encuentran en un estado aceptable. Los test proporcionan a los operadores un motivo para monitorizar el estado de estos sistemas.
- Pantallas de alarmas. Las pantallas de visualización de datos empleadas para presentar las alarmas constituyen una fuente de información saliente y frecuentemente empleada, juegan un rol fundamental, para monitorizar el estado de la planta. Puesto que la activación y la desaparición de las alarmas está acompañada por señales audibles, la pantalla de alarma llama la atención del operador. La respuesta del operador a la alarma puede variar ampliamente. Algunas alarmas se explican por informes deficientes, otras están causadas por actividades de mantenimiento, algunas se ignoran porque no son significativas (no influyen en los objetivos operacionales inmediatos) o no hay nada que el operador pueda hacer al respecto, por ejemplo, no desaparecerán hasta que la unidad se encuentre en modo de parada. Finalmente, algunas alarmas dan lugar a búsqueda de información, por parte de rondistas o personal de mantenimiento, que realizan observaciones adicionales o test en la planta.
- Paneles de sala de control. Los paneles de control, incluyendo las ventanillas de alarmas, y los displays computarizados constituyen una fuente importante de información.

⁴² *Walk-through/talk-through* se denomina técnica de manejo y crítica en UNE-EN ISO 11064-7, que adopta la norma internacional ISO 11064-7:2006.

- Rondistas. Son los encargados de monitorizar los parámetros y componentes que no se ven en la sala de control. Los rondistas emplean listas de chequeo, de forma periódica, para documentar el estado de diversos parámetros. Estas listas son posteriormente revisadas por el operador para monitorizar indirectamente determinados parámetros de la planta. Los rondistas también pueden detectar problemas en la planta, que notifican al operador. Además, después de originarse una alarma, los operadores a veces necesitan confiar en observaciones realizadas por los rondistas para diagnosticar el problema.
- Revisión en la instalación. Periódicamente los operadores realizan inspecciones en planta, con el objeto de conocer a fondo el proceso, mediante la observación directa de los componentes de planta, los instrumentos de la sala de control pueden fallar. Los operadores emplearon esta fuente de información en mayor medida en la planta menos automatizada que, además, mostraba más instrumentación sobre parámetros del estado de la planta. Vicente y Burns (1995, p. 23) relatan la importancia de la percepción directa de los componentes, citando a un operador: “Las cifras y los instrumentos son estupendos, pero si realmente quieres entender lo que está pasando, tienes que salir y ver y sentir”. No obstante, los operadores envían con más frecuencia al personal de mantenimiento a percibir directamente los componentes de interés (Vicente y Burns, 1996).
- Otras unidades. Proporcionan información para obtener un referente que permita comparar los parámetros que los operadores quieren evaluar.

La gran cantidad de fuentes de información y las dificultades para monitorizar una sala de control de una central nuclear excede, en gran medida, la capacidad de atención. Sencillamente, no es posible controlar una central nuclear utilizando sólo los recursos atencionales (Vicente, 2007)⁴³. En los estudios de campo encontraron que los operadores construyeron un modelo de la situación y realizaron la monitorización dirigida por el conocimiento, buscando información específica (Mumaw et al., 2000; Vicente et al., 1997, 2001, 2004). La monitorización dirigida por el conocimiento permite a los operadores detectar problemas antes de que lleguen a ser significativos, compensar el diseño inadecuado de los procedimientos, distinguir fallos de instrumentación de fallos de componentes, y ser más conscientes del estado real de la unidad (Vicente, 2007). Asimismo, los operadores adoptan estrategias para facilitar la monitorización y reducir las demandas cognitivas impuestas por la tarea de supervisar. Estas estrategias se dividen en tres clases (Mumaw et al., 2000; Roth et al., 1997; Vicente, 2007; Vicente et al., 1997, 2001):

- Actividades diseñadas para mejorar la extracción de información, aumentando la relevancia de indicadores importantes y reduciendo el ruido de fondo. Entre las estrategias que facilitan la tarea de monitorizar se encuentran la creación de gráficos de tendencias o de líneas base, al inicio del turno; actividades de gestión de alarma: eliminar las alarmas de la impresora en el cambio de turno, eliminar alarmas no importantes o deshabilitar alarmas molestas en el programa de *software*; usar como referente otras unidades de la planta, el conocimiento de la

⁴³ Vicente (2007) argumenta que hay tres formas de atención que pueden jugar un papel importante en la monitorización. El operador tiene que mantener la atención focalizada en una determinada tarea, incluso si existen tareas menos importantes que compiten por los recursos atencionales del operador. La atención selectiva es claramente relevante, puesto que existen miles de fuentes de información disponible para seleccionar en la sala de control. La atención dividida es importante porque la monitorización está entrecruzada con otras tareas que el operador realiza a diario. No obstante, los resultados de los estudios de campo mostraron que los recursos de atención no son suficientes para convertir lo que parece una tarea imposible en una actividad que se realiza rutinariamente de una manera segura y eficaz.

planta y del contexto actual para guiar la supervisión, esto es, los operadores saben que ciertos tipos de cambios en la planta son más propensos a causar problemas, por lo que de manera proactiva vigilan determinados parámetros más estrechamente, esto les permite anticipar problemas y percibirlos en una etapa temprana; “indicaciones sin intermediarios”, en las que no existe un vínculo sensor-indicador entre el suceso y el operador, se refiere, por ejemplo, al sonido que se escucha en la sala de control ante el fallo en la apertura de determinados componentes o al parpadeo de las luces de la sala de control como precursor de problemas con el suministro de energía y; la búsqueda de información adicional cuando observan un indicador anómalo, consultando información redundante en el panel y a otros operadores.

- Actividades diseñadas para crear nueva información, tales como un nuevo indicador o alarma, o una pantalla de visión general, elaborada con cuatro pantallas de visualización de datos ubicadas en el panel. Vicente (2007) y Vicente et al. (2001) encontraron varios ejemplos en donde los operadores crearon una nueva indicación o alarma. En un caso, ante la sospecha de un problema en una determinada variable, el operador ajustó los límites de alarma sobre ese valor particular, obteniendo una alarma más sensible, denominada *alerta temprana*. En otra ocasión, un operador modificó el punto de tarado de una variable para que el sistema de alarma le notificara si seguía aumentando, evitando así tener que recordar observar periódicamente la variable. Un último ejemplo sucedió ante una variable que debía ser observada pero no tenía almacenada su historia en el ordenador, los operadores aprovecharon el hecho de que había una segunda variable relacionada cuyos registros sí estaban almacenados.
- Actividades destinadas a descargar las demandas cognitivas. Observaron la creación de ayudas y recordatorios externos para monitorizar, la generación de señales externas para la acción o la inacción, y disponer de operadores adicionales para supervisar un pequeño conjunto de indicadores o la pantalla de alarma. Vicente et al. (2001) describen el caso de un operador que, a veces, mantenía una alarma molesta en la pantalla, en vez de eliminar el mensaje de la pantalla, puesto que la alarma podría servir como un recordatorio para realizar una acción. Por ejemplo, para que el personal de mantenimiento solucione el problema, para supervisar la variable más estrechamente o para solicitar periódicamente una tendencia.

Las estrategias adoptadas por los operadores para facilitar la monitorización en dos tipos de salas de control, una principalmente analógica basada en paneles frente a otra que incorporaba tecnología más avanzada y una interfaz computarizada, eran básicamente las mismas; sin embargo, las estrategias se realizaron utilizando diferentes comportamientos, mostrando así el efecto de la tecnología existente en la sala de control (Vicente et al., 1997, 2001).

Por último, entre las dificultades que encontraron los operadores al realizar la tarea de monitorizar estaba el diseño del sistema de alarma, sobre todo en relación con que el diseño no era muy sensible al contexto, por lo que dependía de los operadores la discriminación de las alarmas que eran normales para la situación actual de las que no lo eran (Mumaw et al., 2000; Roth et al., 1997; Vicente, 2007; Vicente y Burns, 1995; Vicente et al., 1997, 2001), siendo la tarea particularmente difícil para los operadores con menos experiencia (Vicente et al., 2001). Mumaw et al. (2000) encontraron que la gran mayoría de los mensajes de alarma en PVD no requerían la intervención del operador. Las estimaciones y los recuentos reales de las plantas revelaron un alto porcentaje de alarmas, a menudo superior al 50%, que no eran significativas.

8.8 INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA LLEVADA A CABO POR LA UNIVERSIDAD DE CHALMERS

Una serie de estudios de investigación, teóricos y empíricos, sobre los sistemas de alarma en diferentes ámbitos de aplicación han sido realizados, en la década de los años 2000, por el grupo de investigación de sistema persona-máquina de la Universidad Tecnológica de Chalmers (Suecia) (Alm y Osvalder, 2011, 2012; Jönsson y Osvalder, 2005; Jönsson et al., 2004; Osvalder y Alm, 2011; Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b, 2009). Los sectores industriales estudiados fueron energía nuclear, industria de celulosa y papel, industria petroquímica (refinerías de petróleo), industria de procesos, tecnología médica y aviación en instalaciones de Suecia. Los principales métodos han sido observaciones in situ en las salas de control y en los simuladores, así como entrevistas con operadores, proveedores y diseñadores de sistemas. Los estudios se centran en recopilar conocimientos sobre cómo estaban diseñados y funcionaban los sistemas de alarma en las salas de control, y la forma en que los operadores trabajaban e interactuaban con los sistemas, con el objetivo de mejorar el diseño del sistema.

Entre los resultados se encuentra la identificación de cómo interactúan los operadores con los sistemas de alarmas en distintos dominios en operación normal y en anomalías (Jönsson et al., 2004); la definición de un modelo teórico cognitivo sobre la forma en que los operadores procesan la información, desarrollado en Jönsson y Osvalder (2005) a partir del modelo de monitorización cognitiva de Vicente et al. (2004) y del modelo de procesamiento de la información de Wickens (1992); el rol del operador (Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b, 2009); el desarrollo de guías y recomendaciones de diseño (Alm y Osvalder, 2012; Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b).

Entre las principales aportaciones de los estudios empíricos de la Universidad Tecnológica de Chalmers cabe destacar las siguientes:

- Los operadores a menudo tratan de gestionar el proceso de forma consciente y proactiva, monitorizan activamente parámetros clave para poder detectar a tiempo las desviaciones (Alm y Osvalder, 2012; Jönsson y Osvalder, 2005; Osvalder y Alm, 2011; Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009). Jönsson y Osvalder (2005) encontraron que la interacción entre el operador y la interfaz del sistema no sólo está impulsada por los datos (en base a factores externos), está también en gran medida iniciada por el propio operador (a partir de factores internos).
- Un factor clave para una actuación exitosa es que los operadores obtienen continuamente información relativa a datos críticos del proceso así como retroalimentación del estado del sistema, de los resultados de sus medidas correctoras y de las secuencias automáticas (Osvalder y Alm, 2011; Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009). La toma de decisiones del operador está muy influida por la información percibida y no depende tanto del nivel de experiencia del operador (Osvalder y Alm, 2011).
- Los operadores consideran que el sistema de alarma funciona satisfactoriamente durante operación normal, pero, durante grandes anomalías, la enorme cantidad de alarmas resulta problemática (Jönsson et al., 2004).
- Jönsson et al. (2004), Thunberg y Osvalder (2007b, 2009) indican que los sistemas de alarma actuales se utilizan principalmente en: 1) operación a plena potencia en estado estable (operación normal), ya que los operadores tratan de optimizar el proceso, necesitando obtener información detallada del proceso; 2) anomalías menores, en donde existe una baja carga de información, y los operadores disponen de tiempo para responder a las diferentes alarmas y

para tener en consideración la información asociada. En otros modos de operación y en grandes anomalías, debido a la elevada cantidad de alarmas, es difícil identificar y seleccionar la información más importante, y los operadores tienen que garantizar la seguridad de la parada (Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009). En lugar de utilizar el sistema de alarma durante las anomalías, la tarea principal de los operadores es mantener la planta en un estado seguro, controlando diversos parámetros clave del proceso y las funciones críticas de seguridad, y seguir diferentes procedimientos. Los operadores trabajan más directamente con el proceso que con el sistema de alarma. Cuando los operadores comprenden que la planta es segura, disponen de tiempo para tratar las alarmas restantes.

- El papel del operador y el objetivo operacional varía en función del modo de operación de la planta y del estado del proceso (Thunberg y Osvalder, 2007a, 2007b, 2009), por lo que existe la necesidad de disponer de un sistema de alarma diseñado para cubrir las diversas funciones del operador en los diferentes modos de operación (Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009), siendo sensible al contexto (Alm y Osvalder, 2011).
- Recomiendan incorporar funciones de apoyo para que el operador pueda crear y utilizar señales externas para disminuir el nivel de carga, por ejemplo, la posibilidad de definir alarmas personalizadas y escribir comentarios con relación a objetos o alarmas. Además, las señales externas pueden reducir la necesidad del operador de recordar información (Thunberg y Osvalder, 2007b, 2009).
- Los resultados de Thunberg y Osvalder (2007a) muestran que las directrices más importantes en el desarrollo de sistemas de alarma son: la consistencia dentro del sistema de alarma y entre el sistema de alarma y el sistema general de control; la necesidad de utilizar una definición de alarma y una filosofía de alarma; incluir los factores humanos desde el inicio del proceso de diseño.
- Proporcionan algunas directrices para facilitar la evaluación de los valores de los parámetros, por ejemplo, el valor debe ser presentado junto con los puntos de tarado y los límites de alarma (Alm y Osvalder, 2012). Para facilitar la interpretación de la alarma, se debe presentar dentro de un marco de referencia claro, por ejemplo, los límites de alarma (Alm y Osvalder, 2012). Algún tipo de indicación de la tendencia del parámetro también es útil y mejora la correcta interpretación de la alarma, ayudando a los operadores a priorizar su trabajo (Alm y Osvalder, 2012). Además, una interfaz de usuario que guía la respuesta inicial del operador contribuye al afrontamiento de la alarma (Alm y Osvalder, 2012).
- Osvalder y Alm (2011) muestran ejemplos de nuevas formas de presentar información visual, integrando la información de alarmas en la interfaz del proceso, adaptada a las necesidades del operador en las diferentes situaciones de control, con el objeto de apoyar el modelo mental de los operadores y su conciencia de la situación.
- Alm y Osvalder (2011) y Osvalder y Alm (2011) proponen la idea de diseñar un sistema de alarma que sea capaz de aprender de las acciones de control del operador. Por ejemplo, un sistema de alarma que informe al operador sobre el tipo de fallo que se ha producido y sugiera acciones correctivas (Alm y Osvalder, 2011). Alm y Osvalder (2011) exponen la idea de diseñar un sistema de alarma que pueda aprender las características de los diferentes operadores, por ejemplo, el sistema puede supervisar el rendimiento de un operador y detectar que el operador ha omitido una cierta respuesta un número de veces, entonces la próxima vez con ausencia de respuesta, el sistema podría ayudar al operador, sugiriendo la acción apropiada.

- Thunberg y Osvalder (2007a) encontraron una queja generalizada de muchas industrias consistente en que las recomendaciones de diseño del sistema de alarma son demasiado generales para su aplicación. Por lo que algunas instalaciones desarrollan, a partir de directrices generales, sus propias guías de estilo de alarmas para la planta, o filosofía de alarma.

8.9 ESTUDIOS ERGONÓMICOS REALIZADOS POR EL INSTITUTO DE INGENIERÍA NUCLEAR DE BRASIL

Investigadores del Instituto de Ingeniería Nuclear de la Comisión Nacional de Energía Nuclear del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Brasil (Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2005, 2006; Carvalho, Dos Santos, Gomes y Borges, 2008; Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain, 2008; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008; Carvalho, Vidal y de Carvalho, 2007; Luquetti dos Santos et al., 2013), con el objeto de la modernización de salas de control de centrales nucleares de Brasil, han realizado una serie de estudios de campo ergonómicos en la sala de control y en un simulador de una central nuclear de Brasil, empleando una metodología basada en el análisis de la actividad, observando a equipos de operadores de la central nuclear en su entorno real de trabajo.

Carvalho (2006) y Carvalho et al. (2007) describen el objetivo de tres estudios de campo llevados a cabo en una sala de control de una central nuclear y durante el entrenamiento en el simulador. El primer estudio, de carácter exploratorio, perseguía obtener una mejor comprensión del entorno de trabajo y de las actividades de los operadores de centrales nucleares. En el segundo estudio, analizaron la actividad de los operadores durante parada y puesta en marcha de la planta. En el tercer estudio, en el simulador de alcance total, observaron a los operadores gestionando la función crítica de seguridad y los procedimientos de operación de emergencia.

En el primer estudio de campo, con la finalidad de analizar el entorno de trabajo y las tareas del operador, e identificar posibles restricciones en las actividades del operador, encontraron limitaciones en el *hardware*, resultado de equipos de I&C obsoletos, y en el sistema de comunicación (Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2005, 2007). El resultado principal, en relación con el sistema de alarma convencional de una central nuclear de Brasil, fue que los diferentes modos de operación de la planta no habían sido plenamente considerados en el diseño del sistema. Durante el cambio de modo de operación, los operadores tuvieron que hacer frente a una gran cantidad de alarmas falsas y espurias, no existió la posibilidad de realizar el *baipás* de alarmas específicas, o grupos de alarmas, sin cometer una violación del procedimiento (Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2005, 2006; Carvalho, Dos Santos, Gomes y Borges, 2008; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008).

Los operadores cometieron una violación al apagar el timbre de alarma para hacer la operación más fácil, dadas las circunstancias: existencia de alarmas molestas y el reactor parado (Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2006; Carvalho, Dos Santos, Gomes y Borges, 2008; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008). Los autores argumentan que debería considerarse como una reconfiguración de los constructos formales en situaciones que no fueron anticipadas en el diseño del sistema (Carvalho, 2006; Carvalho et al., 2006; Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008). Son estrategias cognitivas creadas para hacer frente a situaciones inesperadas y responder a una necesidad de prácticas de trabajo o herramientas adicionales o diferentes (Carvalho, Dos Santos y Vidal, 2008).

En el segundo estudio, Carvalho (2006), Carvalho et al. (2005, 2006, 2007) y Carvalho, Dos Santos, Gomes y Borges (2008), examinaron, por medio del método de análisis de tareas cognitivo, el proceso cognitivo por el que los supervisores toman decisiones ante *micro-incidentes* durante su trabajo en sala de control en operación normal, encontrando que utilizan una estrategia de toma de decisiones naturalista.

En el tercer estudio, para la modernización de la sala de control de C. N. Angra I (sala de control convencional), Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain (2008) y Carvalho, Gomes y Borges (2011) llevaron a cabo un análisis de tareas cognitivo, observando a un equipo, en diferentes modos de operación, en el simulador avanzado *Human System Interface Laboratory* (LABIHS). En la evaluación del sistema de alarma encontraron que no apoya una identificación rápida de la alarma; no proporciona información detallada sobre la naturaleza de la alarma; requiere navegar en las dos pantallas PVD de alarmas en ventanillas para determinar qué alarmas están activas; hay una disposición de las pantallas sin aparente organización; no establece diferencias en cuanto a la severidad o a la importancia de la alarma. Como consecuencia, para remediar las deficiencias, rediseñaron el prototipo de sistema de alarma (Carvalho, Dos Santos, Gomes, Borges y Guerlain, 2008; Carvalho et al., 2011).

Otra actividad ha consistido en definir un marco metodológico para evaluar una sala de control, que incluye el análisis de la actividad del operador y un cuestionario de factores humanos (Luquetti dos Santos et al., 2013). Además, han desarrollado una herramienta informática móvil, para el análisis de la actividad de equipos de operación cuando se utilizan métodos etnográficos, que permite la observación cooperativa (Silva Junior et al., 2012).

8.10 INVESTIGACIÓN SOBRE SISTEMAS DE ALARMA DE KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE (KAERI)

H. C. Lee et al. (1998) investigaron experimentalmente en un simulador PWR, con dos equipos de operación de central nuclear y tres escenarios, dos formas diferentes de presentación de alarmas: listas de alarmas en PVD, ordenadas por tiempo de anunciación, junto con paneles de alarmas en tecnología basada en cableado (*hardwired*) sin incluir características de procesamiento (presentados en ITF - *Integrated Test Facility*) frente a alarmas presentadas en PVD en diagramas del proceso con capacidades de procesamiento (incluidos en el prototipo de sistema de alarma denominado ADIOS - *Alarm and Diagnosis Integrated Operator Support*). Emplearon tres displays para la presentación de alarmas en ADIOS: pantalla de visión general de sistemas del primario, pantalla de visión general de sistemas del secundario y pantalla de listas de alarmas (ordenadas por tiempo, por prioridad y por sistemas).

No encontraron resultados estadísticamente significativos en las medidas de actuación humana relativas a tiempo, tasa de error y conciencia de la situación. No obstante, las entrevistas con los operadores identificaron varios hallazgos relevantes relativos a los sistemas de alarma, entre los que cabe destacar (J. T. Kim et al., 2001; H. C. Lee et al., 1998):

- Los operadores tienden a mirar a las pantallas generales de ADIOS para identificar qué sistemas tienen problemas y, a continuación, acudir a la pantalla de lista de alarma de ADIOS para determinar la alarma clave.

- Durante la fase inicial de los sucesos, los operadores tratan de identificar la alarma clave del suceso.
- Después de que la alarma clave es identificada, los operadores acuden a gráficos de tendencias de parámetros de planta para confirmar su decisión sobre el estado de la planta.
- Los operadores no prestan atención a alarmas que no sean clave, cuando no requieren respuesta inmediata.
- Los operadores se refieren a la pantalla de lista de alarmas en el curso de mitigar los sucesos de la planta.

Concluyen afirmando que, contrariamente a sus expectativas de que los operadores refieren con frecuencia las pantallas de visión general de la planta, una lista de alarmas juega un papel importante en la identificación de la alarma clave durante anomalías en la planta (J. T. Kim et al., 2001; H. C. Lee et al., 1998).

En un estudio posterior, con mensajes de alarma presentados en listas de texto, en donde los operadores podían reorganizar y ordenar los mensajes de alarma conforme a la prioridad de las alarmas o a sistemas relacionados, los operadores se quejaron de que el sistema no apoyaba su patrón de reconocimiento de alarmas y, a veces, dificultaba su entendimiento de la situación. Esto les llevó a implementar una réplica de las ventanillas de alarma en PVD en una central en operación de Corea (J. W. Lee et al., 2010). Concluyen que las capacidades de reconocimiento de patrones de alarma, que los operadores han adquirido al operar con sistemas de alarma convencionales, deberían estar apoyadas también en el nuevo diseño computarizado del sistema de alarma.

Por otro lado, en Kaeri han desarrollado el método de presentación denominado pantalla de ventanilla elástica (*Elastic Tile Display*) para presentar grandes cantidades de información de alarma en un espacio limitado de una sala de control avanzada (Seo, Keum, Park, Suh y Park, 2007; Suh, Jang, Park, Park y Koo, 2006). Se basa en los principios de organización jerarquizada de pantallas, disposición de ventanas que llena espacios y operaciones en ventanas múltiples (Suh et al., 2006). Ha sido inicialmente evaluado con la técnica GOMS-CPM, obteniendo resultados prometedores en el sentido de que puede mejorar la actuación de los operadores, sin imponer carga adicional significativa (Seo et al., 2007).

8.11 INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS DE ALARMA DE TORRALBA ET AL. DE CIEMAT

Las salas de control de las centrales nucleares españolas utilizan principalmente paneles anunciadores para mostrar las alarmas. El sistema anunciador dispone a nivel genérico de entre 1500 y 2000 alarmas mostradas en los anunciadores, sin incorporar mecanismos de estructuración o filtración de alarmas. Esto da lugar a que, en caso de anomalías y emergencias, suele producirse un gran número de alarmas en márgenes temporales reducidos.

En el ámbito nacional, se han llevado a cabo proyectos de I+D para diseñar, desarrollar, evaluar e implantar prototipos y sistemas de alarma avanzados, suplementarios a los paneles anunciadores, con diferente alcance en cuanto al número de alarmas que incorporan. En este apartado, se presentan los principales resultados de proyectos de I+D, llevados a cabo por Torralba et al. del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), en simuladores de reactor BWR y PWR de alcance total, así como en un simulador de sala de control avanzada (simulador gráfico interactivo).

Torralba et al. (1997), Torralba y Zamora (1997) realizaron una evaluación basada en comportamiento, de carácter cualitativo, para explorar la incorporación del prototipo avanzado de alarmas de tecnología BWR en el proceso de gestión de la seguridad de la planta por el operador. Compararon la condición de presencia y ausencia de prototipo en escenarios de anomalías y emergencias, con tres equipos de operación, nueve instructores de simulador agrupados en tres equipos de operación, siendo la información proporcionada por el prototipo complementaria a la del panel de alarmas. El supervisor disponía del prototipo de alarmas en su consola de operación. Entre los resultados cabe destacar que frecuentemente la atención era dirigida en primer lugar a los paneles de alarmas y de indicadores, debido a que las alarmas se anunciaban por medio audible, se reconocían y silenciaban en los paneles de alarmas, y no en el prototipo. El prototipo implica tener que leer las alarmas, mientras que esto no es necesario en las alarmas de los paneles debido a la disposición espacial. También observaron que, en diversas ocasiones, los operadores emplearon el prototipo para confirmar las alarmas. La pantalla general de alarmas (que incluye las denominadas alarmas clave, compuestas por alarmas genéricas y alarmas de sistemas, que han sido procesadas y filtradas, presentadas en disposición fija) fue más útil que la pantalla que los operadores pueden seleccionar a demanda (navegación en ventanas para obtener listas de alarma, libros de alarma o gráficos (P&ID) de algunos sistemas de planta), destacando la funcionalidad de alarmas agrupadas por sistemas. La pantalla a demanda resulta más útil para el análisis posterior del suceso. Además, los operadores han sido entrenados a trabajar en los paneles, por lo que necesitan un período de formación para lograr una familiaridad en la operación del prototipo de alarma en combinación con otras fuentes de información de sala de control. Por último, el prototipo resultó más útil en anomalías durante operación normal y en escenarios menos severos, ya que cuando se alcanza la emergencia es necesario seguir POE.

Torralba et al. (1997), Torralba y Zamora (1997) llevaron a cabo una evaluación basada en comportamiento para evaluar la facilidad de uso de un prototipo de alarmas como sistema de alarmas único. Se acopló el prototipo de alarmas a un simulador gráfico interactivo de una sala de control avanzada tipo BWR. Se llevó a cabo un test de usuario, consistente en la evaluación del prototipo por expertos en el proceso, participando seis instructores de operación, agrupados en dos equipos de operación. El prototipo estaba ubicado en la consola del supervisor, estando disponible, además, la pantalla general en una pantalla de grandes dimensiones para el resto de los miembros del equipo de operación. Encontraron que la información proporcionada por el prototipo resultó de mucha utilidad ya que la sala avanzada no disponía de alarmas; sirvió para detectar rápidamente la anomalía. La pantalla general, en especial alarmas de grupo de sistemas, resultó mucho más útil que la pantalla de selección para obtener información de alarmas, proporcionaba una visión global de la situación. La pantalla de selección fue más adecuada para el análisis posterior, debido al tiempo requerido para navegar en el display. De hecho, en los escenarios, uno de los equipos no empleó la pantalla de selección. El prototipo resultó útil para anomalías de operación normal, ya que cuando se alcanza la emergencia es necesario seguir POE.

Torralba y Zamora (2000a, 2000b) también han llevado a cabo la evaluación desde los factores humanos de dos sistemas de alarma computarizados, como sistemas complementarios al sistema convencional PANALARM, empleando simuladores de alcance total PWR y BWR, y dos equipos de operadores profesionales de cada central participante en el proyecto (C. N. Cofrentes y C. N. Almaraz). Observaron, en general, un uso confirmatorio de ambos sistemas de alarma computarizados, aunque también fueron empleados para detectar en determinados transitorios. Resultó especialmente útil para conocer el origen de la anomalía, al disponer de la hora de aparición de las

alarmas, y también para el análisis posterior del suceso. Una característica del diseño del sistema muy valorada por los operadores fue la inclusión de información de alto nivel, a través de la presentación de alarmas de diagnóstico.

Entre las principales dificultades (Torralba y Zamora, 2000a, 2000b), los operadores relataron tener que leer el texto de la alarma en la pantalla, la ubicación de los sistemas de alarma dificultaba llevar a cabo maniobras en los paneles, al tener los operadores que darse la vuelta y leer el texto en la pantalla de alarma. Habría que reconsiderar la ubicación de las pantallas de alarma, especialmente, su integración en el panel. Los operadores están acostumbrados a trabajar empleando sistemas anunciadores en panel, con las alarmas distribuidas espacialmente, lo que facilita la localización de alarmas y su relación con la información proporcionada por el resto de la instrumentación de la sala de control. El sistema podría ser usado, además de por los operadores de reactor y turbina, por el supervisor de sala, lo que llevaría a tener que realizar un análisis detallado del personal que podría emplear el sistema y la implicación en la filosofía operacional de la planta. En cualquier caso, los operadores preferían mantener la distribución espacial, por lo que incluso una opción alternativa estaría en considerar la aplicación de los mecanismos de filtrado al PANALARM.

Los estudios han puesto de manifiesto una de las principales dificultades que existen cuando un sistema de alarma avanzado se implanta en una sala de control convencional o híbrida: la dificultad de integración del sistema con el resto de la sala de control, habitualmente el control de la operación se sigue realizando desde los paneles.

8.12 ESTUDIO PRINCIPAL DE LA TESIS: OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

El estudio principal sobre sistemas de alarma avanzados ha sido realizado en las instalaciones del Proyecto Halden, en Noruega, empleando un experimento en donde han participado operadores profesionales en activo en una central nuclear en operación. El objetivo principal y las hipótesis detalladas de la investigación están expuestos en este apartado.

8.12.1 Objetivos de la investigación

El sistema de alarma constituye una fuente de información fundamental para la gestión adecuada de situaciones de incidente y accidente en el control de procesos. Es necesario explorar los patrones de actuación del operador en situaciones donde el sistema de alarma es crucial para la operación. Una vez que el operador detecta la alarma, tiene que interpretar el mensaje y tomar las acciones necesarias para investigar la causa de la anomalía y llevar a cabo las acciones necesarias para el control de la planta.

Se persigue obtener datos empíricos, bases técnicas para los modelos de actuación humana en la gestión de anomalías en procesos complejos, proporcionando información sobre el uso de las alarmas en las distintas etapas del procesamiento de la información, como son la monitorización, la detección y la toma de decisiones y la solución de problemas. Por consiguiente, en el estudio se considera el rol de las alarmas en el contexto de la tarea, lo que comprende explorar en qué parte de la interfaz busca el operador la información durante las distintas etapas del escenario.

En la sala de control avanzada de HAMMLAB se proporciona información de alarmas distribuida en diversas partes de la interfaz, no sólo en el sistema de alarma CASH. Hay información de alarmas integrada en el display de visión general en pantalla de gran tamaño, todas las alarmas se presentan en los formatos del proceso NORS sin aplicar ningún mecanismo de supresión, las curvas de tendencias de los diferentes parámetros pueden mostrar información de alarmas si el proceso se encuentra en situación de incidente, accidente o emergencia.

El objetivo es analizar la actividad visual, obtenida con datos de seguimiento de movimientos oculares, considerando, asimismo, el análisis de datos de otros registros, entre ellos, cintas de vídeo, registros del simulador y protocolos de actuación de expertos en el proceso. En el análisis de la actividad visual de los operadores se toma en consideración toda la información disponible por el operador durante el escenario (alarmas en ventanillas, listas de alarmas, tendencias, display de visión general en pantalla de gran tamaño, formatos del proceso NORS, etc.), con el objeto principal de explorar la utilización de las alarmas en el marco de la información disponible en la interfaz de la sala de control. El uso de la información por el equipo de operación se analiza durante unos períodos de tiempo seleccionados en los escenarios del experimento de automatización centrada en la persona.

Se pretende dar respuesta a cuestiones como: ¿cuál es el proceso seguido para la obtención de información?, ¿depende éste del número de alarmas activas?, ¿está en función del tipo de anomalía?, ¿se atiende a las nuevas alarmas? y ¿para qué usan los operadores las alarmas?

8.12.2 Hipótesis del estudio

Se definen y presentan una serie de hipótesis y de predicciones relacionadas con la actuación humana y la interfaz del sistema de alarma en una instalación de simulación de una central nuclear tipo PWR. Las hipótesis se han formulado a partir de estudios descritos en la revisión del estado del arte así como en nuestra experiencia en el diseño y la evaluación de la interfaz de sistemas de alarma en simuladores de salas de control del ámbito nuclear.

En la definición de hipótesis, no se han abordado aspectos de *hardware* ni de *software*, al ser considerados como una variable estable, puesto que el Proyecto Halden ha realizado previamente una serie de evaluaciones ergonómicas del sistema de alarma CASH en la instalación experimental, cuyos principales resultados hemos resumido previamente en relación con los experimentos del sistema CASH (ver apartado 8.2.2.3).

Dos de los operadores usaban gafas. De ellos, un operador de reactor seleccionó el AOI del primario de la pantalla de visión general de gran tamaño en una pantalla de la fila inferior de su estación de trabajo en todos los escenarios, lo que conllevó alguna limitación a la hora de realizar la puntuación de las fijaciones en el AOI.

Las hipótesis y predicciones propuestas para corroborar, o refutar, en el estudio principal del proyecto son las siguientes⁴⁴:

- Hipótesis 1: los operadores mirarán al sistema de alarma aproximadamente un 10% del tiempo disponible en el escenario.

⁴⁴ Las hipótesis y predicciones se presentan en inglés en el apartado de resultados.

- Hipótesis 2: el tiempo de detección del turno de operación será menor si existe un mensaje de alarma que indique claramente el transitorio.
- Hipótesis 3: todos los equipos de operación detectarán las anomalías que dispongan de un mensaje de alarma asociado al transitorio principal.
- Hipótesis 4: la lista de alarmas será la principal fuente de información, aunque no la única, para la detección del transitorio. Se explorará la pregunta de investigación relacionada con la existencia de un patrón sistemático para detectar algunas anomalías en una determinada pantalla.
- Hipótesis 5: el sistema de alarma será utilizado para varios propósitos, con diversas funciones. El sistema de alarma se utilizará principalmente en la etapa de detección, que constituye la función primaria del sistema de alarma: alertar y dirigir la atención a la anomalía. No obstante, los operadores también mirarán al sistema de alarma durante las fases de toma de decisiones y ejecución de la respuesta (implementación de acciones correctivas) y, en menor medida, en la etapa inicial de monitorización.
- Hipótesis 6: el uso de la información de alarma seguirá una tendencia cuadrática ante la aparición de la anomalía, en la fase de detección, es decir, primero se incrementará el tiempo dedicado al sistema de alarma, luego disminuirá en función del tiempo de ocurrencia.
- Hipótesis 7: el número de accesos visuales (datos de frecuencia) al sistema de alarma, la lista de alarmas, las alarmas en ventanillas y las cuatro AOIs de la lista de alarmas (código identificador, texto, valor y tiempo y otras partes de la lista de alarmas) se distribuirá de manera uniforme en todos los equipos y escenarios.
- Hipótesis 8: la cantidad de tiempo (datos de duración) dedicado al sistema de alarma, la lista de alarmas, las alarmas en ventanillas y las cuatro AOIs de la lista de alarmas se distribuirá de manera uniforme en todos los equipos y escenarios.
- Hipótesis 9: el número de accesos visuales de los operadores a las alarmas en ventanilla será menor, con una diferencia estadísticamente significativa, que a la lista de alarmas.
- Hipótesis 10: el tiempo de duración de los accesos visuales de los operadores a las alarmas en ventanilla será estadísticamente menor que a la lista de alarmas.
- Hipótesis 11: en la lista de alarma, el código identificador de alarma (*tag*) y el texto de alarma (*text*) proporcionan una información equivalente para la identificación de la alarma. La hipótesis es que los operadores con más experiencia leerán principalmente el código de la alarma mientras que los operadores con menos experiencia utilizarán fundamentalmente el texto de la alarma.
- Hipótesis 12: los operadores harán un mayor número de acciones de silenciar las alarmas que de reconocer o comprimir. La predicción específica es que la cantidad de acciones será, en orden decreciente: silenciar, reconocer y comprimir.
- Hipótesis 13: para reconocer y comprimir las alarmas, los operadores harán uso principalmente de las opciones individuales (primario para los operadores de reactor y secundario para los operadores de turbina), en vez de las opciones globales, que actúan simultáneamente en las pantallas de alarma de ambos operadores.

9 MÉTODO

En la sección se describe, de forma detallada, el método seguido en el estudio experimental.

9.1 PARTICIPANTES

En el estudio participaron dieciocho operadores con licencia de la central nuclear de Loviisa de Finlandia, agrupados en seis equipos de operación, compuesto cada uno por supervisor, operador de reactor y operador de turbina. Los miembros de los equipos de operación asumieron el mismo rol que habitualmente desempeñan en la planta. En todos los equipos de operación al menos dos de los participantes pertenecían al mismo turno, sólo dos de los equipos estuvieron formados por el personal de operación que habitualmente trabaja conjuntamente en los turnos de la planta⁴⁵.

En la tabla 9-1 se muestran las principales características de la muestra, en cuanto a edad y experiencia (en años). Los participantes eran todos varones.

Tabla 9-1. *Edad y Experiencia de los Operadores*

Equipo	Edad y Experiencia	Operador de Reactor	Operador de Turbina	Supervisor	Promedio del equipo
1	Edad	49	50	53	50,70
	Experiencia	20	23	20	21,00
2	Edad	52	51	33	45,30
	Experiencia	24	21	5	16,70
3	Edad	48	34	33	38,30
	Experiencia	18	6	6	10,00
4	Edad	37	33	48	39,30
	Experiencia	7,5	5,5	19	10,70
5	Edad	31	38	45	38,00
	Experiencia	4	12	14	10,00
6	Edad	34	49	35	39,30
	Experiencia	5	20	5	10,00
<i>Promedio del puesto</i>	Edad	41,83	42,50	41,17	41,83
	Experiencia	13,08	14,58	11,50	13,06

Existen diferencias en la edad y experiencia de los operadores, puesto que la selección de los equipos tuvo que realizarse en función de la disponibilidad del personal de planta. Los operadores tenían edades comprendidas entre 31 y 53 años, mientras que el 38,89% de los operadores estaba entre 31 y 35 años, el 27,78% de los operadores entre 46 y 50 años. La media de edad de los operadores de reactor era de 41,83 años, de los operadores de turbina de 42,50 años y de los supervisores de 41,17 años. La media de edad de los equipos de operación era de 41,83 años. El promedio de edad de los equipos variaba entre un máximo de 50,7 años por equipo y un mínimo de 38 años por equipo.

Todos los operadores tenían más de cuatro años de experiencia de operación en la sala de control. El promedio de experiencia de los operadores de reactor era de 13,08 años, de los operadores de turbina de 14,58 años y de los supervisores de 11,50 años. El promedio de experiencia de los equipos era de 13,06 años, variando entre un máximo de 21 años por equipo y un mínimo de 10 años por equipo.

⁴⁵ Los operadores indicaron que el hecho de no ser todos los componentes habituales del turno de operación tiene una influencia mínima en su comportamiento en el experimento.

9.2 PROCEDIMIENTO

Los datos experimentales de los escenarios pertenecen a un experimento sobre automatización centrada en la persona, cuyo objetivo era desarrollar conocimiento (en forma de modelos y teorías) y herramientas (en forma de técnicas y simuladores) para apoyar el diseño de la automatización y una actuación humana efectiva.

El experimento de automatización centrada en la persona, de carácter exploratorio, se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Interacción Persona-Maquina HAMMLAB del Proyecto Halden. Como el experimento perseguía aumentar el conocimiento sobre cómo influye la automatización en la actuación de los operadores en las salas de control de centrales nucleares, se consideraron dos tipos diferentes de automatización, extensa y limitada, en una serie de escenarios con dos grados de complejidad, alta y baja, implicando tareas de diagnóstico y tareas de seguimiento de procedimientos (Hollnagel y Miberg, 1999).

La recogida de datos en el experimento de automatización se muestra en la tabla 9-2 (Hollnagel y Miberg, 1999, p. 30).

Tabla 9-2. Programación de la Toma de Datos (Hollnagel y Miberg, 1999)

Hora	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
08:00		Formación	Escenario	Escenario
10:00		Introducción	Escenario	Escenario
12:00		Comida	Comida	Comida
13:00	Formación	Escenario de prueba	Escenario	Sesión de interfaz
15:00		Escenario		

Se dispuso de dos días de formación, aproximadamente siete horas, antes de la recogida de datos para familiarizar a los operadores con la disposición de la sala de control y con el simulador NORS. En la sesión introductoria los operadores fueron informados del experimento, del uso restringido de los datos obtenidos, se solicitó su consentimiento para las tomas de datos; por otro lado, también les administraron cuestionarios sobre su experiencia y su concepción de la automatización. Posteriormente, participaron en un escenario de formación y, al final del segundo día, se llevó a cabo el primer escenario. El tercer día se ejecutaron tres escenarios diagnósticos y, durante el cuarto día, se realizaron los dos escenarios de tarea procedimental. No se introdujeron pausas en los escenarios durante la toma de datos. Por último, participaron en una sesión sobre aspectos de la interfaz de HAMMLAB, antes de agradecerles su participación (Hollnagel y Miberg, 1999).

Los principales resultados de Hollnagel y Miberg (1999), en los escenarios de tipo diagnóstico, indicaron que la opinión de los operadores sobre la eficiencia del equipo estaba relacionada con su grado de confianza en la automatización. Encontraron que los operadores confiaron menos en la automatización y evaluaron una actuación del equipo más baja en situaciones donde el rendimiento del equipo era eficiente y viceversa.

Hay que destacar que no existió ningún tipo de presión externa para que el equipo de operación empleara el sistema de alarma.

La presentación de alarmas en el experimento se realizó en dos niveles: displays de visión general (lista de alarmas y alarmas en ventanillas) y displays de diagramas detallados del proceso NORS. En este diseño del sistema de alarma no se incluyó el display selectivo de alarmas. La

información del nivel de visión general está siempre disponible, los operadores no pueden modificar la disposición ni el contenido de la información (Førdestrømmen, Moum y Torralba, 1994; Moum, Decurnex, Førdestrømmen, Karlsen y Olsen, 1996). Las pantallas de alarma estaban ubicadas contiguas, sin espacio entre ellas, en la fila superior del nivel de visión general en el extremo derecho (operador de reactor) o en el extremo izquierdo (operador de turbina). En ambos casos, la pantalla de lista de alarmas estaba en una posición más cercana a la pantalla de visión general de gran tamaño que la pantalla de alarmas en ventanillas (ver las figuras 9-3, 9-4 y 9-5).

9.3 MEDIDAS

Los datos de seguimiento de movimientos oculares del experimento de automatización se emplean para analizar la actividad visual del operador de reactor y de turbina en los escenarios. Los análisis de seguimiento de movimientos oculares se complementan con otros registros, como las cintas de vídeo, los registros del simulador y la evaluación de expertos en el proceso⁴⁶ (denominado en el resto del documento instructor) sobre la detección y actuación del equipo.

9.3.1 Seguimiento de movimientos oculares

En el experimento se recogieron datos de seguimiento de movimientos oculares de los dos operadores: de reactor y de turbina, empleando el *eye tracker*, que es un aparato de seguimiento de la mirada, registra los datos del tiempo que se emplea observando las distintas partes de interfaz de la sala de control.

9.3.1.1 ¿Qué son los movimientos oculares?

Los movimientos oculares son necesarios debido a las limitaciones de agudeza del sistema visual. El objetivo de los movimientos oculares en la lectura es situar la región de la fovea de la retina (cubre un grado del ángulo visual a la derecha e izquierda de la fijación) en la parte del texto que se está procesando, puesto que la agudeza visual es más nítida y las letras pueden leerse fácilmente (Rayner, 1995). Durante la lectura se realizan movimientos oculares sacádicos muy rápidos y también hay períodos de tiempo muy breves en donde los ojos están relativamente quietos (fijaciones oculares).

Rayner (1995, 1998) destaca que la duración promedio de la fijación es de 200-250 ms (aunque el rango puede variar de 100 ms a más de 500 ms, por ejemplo, en la búsqueda visual es de 275 ms) y que la longitud media del movimiento sacádico es de 7 a 9 espacios de letras, no obstante, puede variar de un espacio de una letra a más de 15 letras, por ejemplo, en la búsqueda visual es de 3 grados. La medida que suele emplearse de movimientos oculares es espacios de letra, en vez de ángulo visual, generalmente, los espacios de 3-4 letras equivalen a un grado de ángulo visual (Rayner, 1995).

⁴⁶ El experto en proceso también actuó en el simulador como *instructor*, según se denomina habitualmente en la industria nuclear, su trabajo consiste en formar a los operadores, también es el responsable de la simulación y de la implementación y el desarrollo de los escenarios. No obstante, formalmente en HAMMLAB no existía la figura del instructor, como se explica en la sección 9.5.4.1.

9.3.1.2 Hipótesis ojo-mente

Just y Carpenter (1980) formularon la influyente *hipótesis ojo-mente* (*eye-mind hypothesis*), que establece que no existe una diferencia apreciable entre el objeto de la fijación y lo que se procesa⁴⁷. Moray y Rotenberg (1989) postulan que las fijaciones oculares están estrechamente relacionadas con la atención visual. Las fijaciones reflejan el foco de atención del operador en un determinado momento (Goldberg, 1999) e implican realizar un proceso cognitivo de recogida de la información del entorno así como la integración de la información precedente con la venidera para planificar a qué zona dirigir la siguiente fijación ocular (Ergoestudio, 2004a; Just y Carpenter, 1976). Just y Carpenter (1976) argumentan que los participantes deberán tener tareas a realizar muy definidas, de forma que sus movimientos oculares puedan ser atribuidos a un procesamiento cognitivo real. La hipótesis ojo-mente resulta suficientemente consistente para poder extraer conclusiones objetivas sobre los procesos cognitivos que originan o desencadenan las fijaciones durante la exploración visual (Hassan Montero y Herrero Solana, 2007).

Existe una alta correlación entre lo que se mira y se atiende, aunque no se puede tener la absoluta seguridad de que atendemos a lo que estamos mirando (Hassan Montero y Herrero Solana, 2007; Lillo, 2000), ni que la proyección de algo en el centro de la mirada asegure su reconocimiento (Abernethy, 1988; Stagar y Angus, 1978, citado en Lillo, 2000). Puesto que los elementos más importantes son aquellos sobre los que tiende a centrar la mirada el observador (Lillo, 2000; Wickens, 1992), el registro de movimientos oculares puede ser de gran utilidad para diseñar el entorno de trabajo (Lillo, 2000).

El patrón del movimiento ocular revela el espacio donde los usuarios están interesados (Fengpei, 2006). Así mismo, Lillo (2000) argumenta que el estudio de los movimientos oculares proporciona importantes claves, respecto a lo que se busca y a cómo se hace. La dirección de los ojos se puede emplear como una medida de la adquisición de información y puede indicar el contenido del pensamiento (Underwood y Everatt, 1992, citado en Hauland, 2002), por lo que las fijaciones oculares son un medio efectivo de obtener información del entorno visual (Hauland, 2002). Y, además, el argumento de Kirwan, Kaarstad, Hauland y Follesø (1995) de que el seguimiento de movimientos oculares revela cuando no se observa algo, dicha información a menudo proporciona pistas claras sobre las razones del fallo en el diagnóstico.

Drøivoldsmo et al. (1998) y Ha y Seong (2010, 2014) argumentan que la hipótesis ojo-mente es factible en el contexto de experimentos en simulador. La información de la interfaz es importante para la operación del sistema, considerando, además, que los participantes en los experimentos son profesionales con experiencia en su campo (Drøivoldsmo et al., 1998). La recopilación de información visual de la interfaz (formatos de procesos, sistema de alarma, diagramas de tendencias, etc.), que realizan los operadores en la sala de control, es la principal fuente para la percepción de los elementos relevantes (Drøivoldsmo et al., 1998). En centrales nucleares, los operadores con experiencia no prestan atención a todas las fuentes de información en situaciones anómalas, de hecho no es posible, en cambio, usan un conjunto de síntomas de las fuentes de información, que integran para diagnosticar (Ha y Seong, 2014). Como Drøivoldsmo et al. (1998) exponen, en sistemas complejos con multitud de componentes y parámetros del proceso representados en la interfaz de usuario, la probabilidad aleatoria de mirar a información asociada con la anomalía simulada es muy baja.

⁴⁷ “There is no appreciable lag between what is being fixated and what is being processed” (Just y Carpenter, 1980, p. 331).

9.3.1.3 Unidad de análisis de las fijaciones: área de interés

Las medidas de adquisición intencionada de información definen la unidad visual de análisis que puede representar un significado cognitivo (Underwood y Everatt, 1992, citado en Hauland, 2002); la unidad visual de adquisición de información se suele definir a partir de 250 ms de duración (Deubel et al., 1999 citado en Hauland, 2002). Puesto que la unidad de análisis implica significado cognitivo, Hauland y Hallbert (1995) y Hauland (2002, 2008) recomiendan no reducir la unidad de análisis a fijaciones individuales y, además, la definición de la unidad de análisis por la permanencia en un área de interés (AOI). La permanencia en las AOI son varias fijaciones dentro del mismo AOI, siendo la definición operacional: la cruz del movimiento ocular debe estar dentro de los límites de un AOI durante un tiempo mínimo de 250 ms, por lo tanto, en cuanto la cruz está fuera de los límites de un AOI específica la permanencia (duración) finaliza (Hauland, 2002, 2008).

Un AOI puede tener cualquier tamaño y forma, se puede definir con diferentes niveles de abstracción, dependiendo del objetivo de medición. Por lo tanto, un AOI podría ser una pantalla completa, un componente, un valor determinado del proceso. Debido a limitaciones técnicas de los sistemas de seguimiento ocular, resulta más práctico definir las AOI como áreas estáticas, puesto que la permanencia en las áreas estáticas puede analizarse automáticamente (Hansen, Hauland y Andersen, 2001, citado en Hauland, 2002).

Existe una variedad de medidas de movimientos oculares, que facilitan la interpretación objetiva de la exploración visual del participante. Poole y Ball (2005) revisan las métricas de movimientos oculares empleadas para examinar la facilidad de uso de la interfaz, cubriendo las fijaciones, el movimiento sacádico, las secuencias de búsqueda (*scanpaths*) y el tamaño de la pupila. Las métricas de fijaciones cubren el número global de fijaciones, el número de fijaciones sobre un AOI, el número de fijaciones sobre un AOI ajustada a la longitud del texto, la duración de la fijación, el ciclo de la fijación, la densidad espacial de las fijaciones, las fijaciones repetidas, el tiempo transcurrido hasta la primera fijación en el AOI, así como el porcentaje de participantes que se fija en el AOI. Fengpei (2006) describe los patrones de seguimiento de movimientos oculares empleados en los test de facilidad de uso, destacando el número de puntos de la mirada, la duración de la mirada en cada AOI, la duración promedio de la mirada, el número de puntos de la mirada, el promedio de tiempo mirando a cada AOI, el promedio de la mirada, así como el patrón de búsqueda o el número de miradas en el AOI.

En este estudio se emplean las medidas de datos de frecuencia y de duración de las fijaciones en las AOI como principales variables dependientes.

9.3.2 Registros del simulador

Los registros de datos se emplean junto con las cintas de vídeo y de audio en las sesiones de análisis de datos. El simulador consta de dos registros de datos de los escenarios: el registro de las variables (*variable log*) y el registro de los experimentadores (*experimenters log*).

El análisis de los registros del simulador ha permitido obtener la secuencia temporal de la implementación y del desarrollo de los transitorios, la secuencia de activación y desactivación de las alarmas de ambos operadores, el manejo de los controles de las alarmas (reconocer, silenciar y comprimir), las selecciones realizadas por los operadores en las distintas pantallas de la fila inferior

(formatos del proceso NORS o tendencias) y el componente (bomba, válvula, etc.) seleccionado para realizar las acciones correctoras.

9.3.2.1 Registro de variables del simulador

El registro de variables consta de noventa y nueve parámetros importantes del proceso, que han sido especificados por expertos en el proceso (Miberg, 1998a). Se actualiza cada diez segundos en función del tiempo del simulador.

9.3.2.2 Registro de experimentadores del simulador

En el registro de experimentadores se incluye, en orden temporal de ocurrencia, información de las alarmas, de los sucesos del proceso, de las acciones de los experimentadores y de las acciones realizadas por los operadores (Førdestrømmen y Kvalem, 1996). Los nuevos datos se incorporan automáticamente en el registro, siendo la resolución máxima de 1,5 segundos. Los datos se pueden exportar a un fichero de Microsoft Excel, para su depuración y posterior análisis (Jokstad, Falt, Karlsson, Kvalem y Skraaning, 2002).

Los campos más relevantes del registro de experimentadores empleados en el estudio se describen en la tabla 9-3.

Tabla 9-3. Registro de Experimentadores del Simulador

Denominación del Campo	Descripción del Campo
Hora real (<i>real time</i>)	Hora real en Noruega (GMT + 01:00).
Tiempo del simulador (<i>simulator time</i>)	Es el <i>tiempo de activación</i> del simulador contado en segundos. Arranca cuando se inicia el simulador y para cuando se congela el simulador. No suele resetearse durante los escenarios. Se corresponde con los códigos temporales del registro de variables del simulador.
Tiempo transcurrido (<i>elapsed time</i>)	Empieza cuando se inicia el escenario en el simulador y continúa hasta que finaliza el escenario. El reloj no se detiene cuando el simulador se congela. Controla el registro de experimentadores. Durante el escenario no es posible leer el <i>tiempo transcurrido</i> , pero éste puede inferirse, ya que se corresponde con el reloj del vídeo. El tiempo transcurrido del simulador sigue el tiempo de activación, pero se resetea a 00:00 cuando se presiona el botón de inicio del escenario.
Tiempo de activación (<i>run time</i>)	Se inicia en el tiempo simulado del escenario (por ejemplo, 13:45) y para si se congela el simulador y/o finaliza el escenario. Controla el registro de variables, cuando el registro de variables se activa después del período de preparación del escenario.
Tipo (<i>type</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - ME: selecciones del menú. - IA: acciones del instructor. - CA: alarmas CASH. - PE: suceso del proceso. - AA: reconocimiento de la alarma.
Identificador de CASH (<i>CASH id</i>)	TAG de la alarma.
Texto de CASH (<i>CASH text</i>)	Mensaje de la alarma.
Valor CASH (<i>CASH value</i>)	Alarma activada o desactivada.
Identificador del proceso (<i>process event id</i>)	TAG de la variable del proceso.
Texto del proceso (<i>process event text</i>)	Mensaje de la variable del proceso.
Valor del proceso (<i>process event value</i>)	Arrancado o parado, abierto o cerrado, encendido o apagado, etc.
Acciones del instructor (<i>instructor actions</i>)	Acciones del instructor/experimentador.
Fuente del suceso (<i>event source</i>)	Máquina.
Objeto o componente (<i>object/component</i>)	Selección de pantalla, teclado, componente.
Texto/valor del suceso (<i>event text/value</i>)	Acciones realizadas en el teclado, tales como: selección de una nueva pantalla, cerrar una ventana, abrir el teclado en la pantalla (<i>soft-keyboard</i>), información de un componente, silenciar, etc.
Reconocimiento de alarma	Reconocimiento de la alarma.

Denominación del Campo	Descripción del Campo
(alarm acknowledge)	
Función crítica de seguridad (CFMS CSF)	Texto de la función crítica de seguridad.
Valor de la función crítica de seguridad (CFMS value)	Valor de la función crítica de seguridad: activada.
Reconocimiento de función crítica de seguridad (CFMS acknowledge)	Reconocimiento de la función crítica de seguridad

Las acciones realizadas por los operadores se identifican fácilmente en los registros del simulador por el nombre de la máquina a la que está conectada la pantalla (ver figura 9-1, Miberg, 1998a), estando las características de las máquinas descritas en Førdestrømmen y Kvaem (1996).

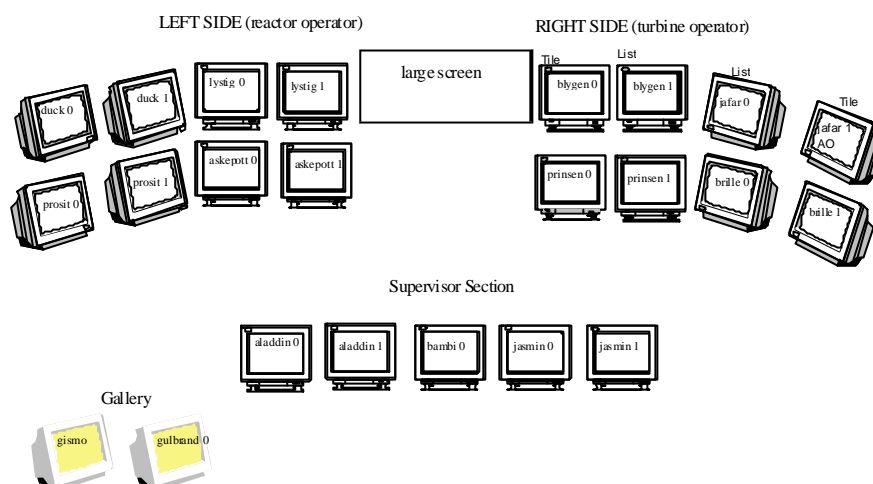


Figura 9-1. Disposición del laboratorio indicando las máquinas conectadas a cada monitor (Miberg, 1998a).

9.3.3 Registro de ocurrencias

El registro de ocurrencias para cada uno de los escenarios muestra, en orden temporal, los comentarios realizados durante el experimento en tiempo real por un experto en el proceso (Miberg, 1998b). En el registro de ocurrencias se indican las acciones llevadas a cabo por los operadores, las expectativas o previsiones, por parte del experto en el proceso, sobre la actuación de los operadores, mientras que en otras ocasiones proporciona un resumen de la comunicación del equipo.

9.4 DISEÑO

El diseño experimental era un diseño intra-sujetos en donde cada equipo participó una única vez en cada condición experimental, siendo un diseño factorial de bloques aleatorios y medidas repetidas.

Se han empleado varios sub-diseños, en función de las hipótesis o predicciones formuladas. Los diseños específicos empleados para los diferentes objetivos del estudio se explicitan en cada análisis de datos de la sección de resultados, tanto para el tiempo total del escenario como para los períodos del escenario. Por citar algunos de los diseños, entre-sujetos 2x3: el puesto del operador y el número o la duración de los accesos visuales a las AOI del sistema de alarma (sistema de alarma, alarmas en ventanilla, alarmas en lista y las cuatro áreas de la lista de alarmas) en tres escenarios; diseño intra-sujetos 2x2: puesto del operador y las pantallas del sistema de alarma (lista frente a

ventanilla) en cada escenario; diseño intra-sujetos 2x5: puesto del operador y las cuatro AOI de la lista de alarmas y las alarmas en ventanilla.

9.4.1 Variables dependientes

En el estudio se han empleado diversas variables dependientes: las fijaciones en el AOI (frecuencia y duración), el tiempo de detección de la anomalía y la fuente de información (AOI de la interfaz) para detectar la anomalía.

9.4.1.1 Fijaciones en el área de interés: frecuencia y duración

Las variables dependientes son las fijaciones en cada AOI, empleando dos de las métricas más utilizadas en los estudios de *eye tracking*⁴⁸ (Marcos y González-Caro, 2010; Poole y Ball, 2005; Skraaning y Andresen, 1999): frecuencia y duración en AOI.

9.4.1.1.1 Datos de frecuencia

Los datos de frecuencia del estudio se refieren al número de fijaciones en las AOI: el número de veces que los operadores fijan la vista en cada área.

9.4.1.1.2 Datos de duración

Los datos de duración en el estudio están constituidos por la duración de las fijaciones en las AOI: el tiempo que los operadores permanecen con la mirada fijada en cada área.

9.4.1.2 Tiempo de detección de la anomalía

El tiempo empleado para la detección de la anomalía ha sido considerado para explorar diferencias entre transitorios que muestran, o no disponen de, una alarma asociada con la anomalía.

9.4.1.3 Fuente de información de la interfaz para detectar la anomalía

La fuente de información de la interfaz ha sido tomada en consideración para analizar posibles diferencias entre el empleo del sistema de alarma frente a otras fuentes de información (por ejemplo, los formatos del proceso o la pantalla de visión general de gran tamaño) así como las alarmas en ventanilla frente a las alarmas en lista.

9.4.2 Variables independientes

Las variables independientes empleadas dependen del diseño experimental de cada método de análisis de datos. Las variables independientes han sido las AOI (en unas ocasiones treinta, en otras doce, cinco o dos AOI), el tipo de escenarios y el orden de presentación de los escenarios, las acciones de gestión de la alarma, el equipo de operación y el rol del operador.

9.4.2.1 Áreas de interés de la interfaz

Las AOI se definieron en la etapa de planificación del estudio principal, durante el estudio piloto, realizado para uno de los escenarios.

⁴⁸ El término inglés *eye (movement) tracking* se podría denominar técnica de seguimiento de la mirada o técnica de seguimiento de movimientos oculares o herramienta de seguimiento ocular. En el documento se ha optado por la expresión técnica de seguimiento de movimientos oculares.

9.4.2.1.1 Definición de las áreas de interés en el estudio principal

Se han especificado treinta AOI. Es primordial la especificación de las AOI en la plantilla, puesto que una vez iniciado el proceso de puntuación, la plantilla no puede ser modificada. En la tabla 9-4 se presenta la denominación del AOI en el teclado sensible al tacto, la denominación del AOI en la plantilla y se agrupan, en la última columna, las treinta áreas en doce AOI.

Tabla 9-4. Definición de Áreas de Interés del Estudio

Area de Interés	Denominación del Área de Interés (en el teclado)	Denominación del Área de Interés (en la plantilla)	Grupos de Áreas de Interés
1	CFMS	CFMS. Large Screen Overview	Large screen overview
2	VOLUME, BORIC	Volume and Boric. Large Screen Overview	
3	REACTOR, PRIMARY	Reactor and Primary. Large Screen Overview	
4	SECONDARY	Secondary. Large Screen Overview	
5	OTHERS	Other alternatives. Large Screen Overview	
6	PLANT PROTECTION	Plant protection. Large Screen Overview	
7	EMERGENCY	Emergency. Large Screen Overview	
8	PLANT BALANCE	Power balance. Large Screen Overview	
9	ELECTRICAL, DIESEL	Electrical and Diesel. Large Screen Overview	
10	LARGE SCREEN IN LOW LEVEL	Lower row of the operator's screens. Large Screen Overview	
11	OVERVIEW TREND	Trends in the Trend Overview Screen	Trends in the overview
12	OVERVIEW VALUE	Values in the Trend Overview Screen	
13	AUTOMATION OVERVIEW	Automation Overview Screen	Automation overview
14	ALDIV	ALDIV System Screen	Aldiv
15	TAG (LIST)	TAG of the Alarm List Overview Screen	Alarm list
16	TEXT (LIST)	Alarm Message Text in the Alarm List Overview Screen	
17	VALUE (LIST)	Alarm Value in the Alarm List Overview Screen	
18	OTHERS (LIST)	Other alternatives in the Alarm List Overview Screen	
19	TILE	Alarm Tile Overview Screen	Alarm tile
20	OTHER OPERATOR' SCREENS	Other Operator Screens	Other operator' screens
21	COMMUNICATION	Communication between RO – TO – SS	Team communication
22	NORS 4 / 1	NORS, Screen 4 (left)	NORS process formats
23	NORS 3 / 2	NORS, Screen 3	
24	NORS 2 / 3	NORS, Screen 2	
25	NORS 1 / 4	NORS, Screen 1 (right)	
26	NOT SPECIFIED	Anything else or not specified	Not specified
27	PROCEDURE	Read or Check Procedure	Procedures
28	CHECK PROCEDURE	Verify if is using Procedures	
29	TREND – TREND	Trends in any Trend Screen	Trends in lower level
30	TREND – VALUE	Values in any Trend Screen	

Las treinta AOI empleadas en el estudio principal se definen del siguiente modo:

- AOI 1. *Large screen overview: CFMS*. Se refiere al sistema de monitorización de funciones críticas de seguridad.
- AOI 2. *Large screen overview: volume and boric*. Comprende los sistemas volumétrico (TK, TE y TC) y de aporte de boro y dilución (TB).

- AOI 3. *Large screen overview: reactor and primary*. Incluye los sistemas del reactor y del primario.
- AOI 4. *Large screen overview: secondary*. Se refiere al sistema secundario.
- AOI 5. *Large screen overview: other alternatives*. Está constituida por otras zonas de la pantalla no consideradas en el resto de categorías (como la hora o el modo de operación) así como cuando resulte complicado discriminar el área de visión del operador en la pantalla de gran tamaño.
- AOI 6. *Large screen overview: plant protection*. Comprende el sistema de protección de la planta.
- AOI 7. *Large screen overview: emergency*. Se refiere a los sistemas de emergencia: el sistema de inyección de alta (TJ), sistema de inyección de baja (TH) y sistema de rociado (TQ).
- AOI 8. *Large screen overview: power balance*. Comprende el balance de la planta.
- AOI 9. *Large screen overview: electrical and diesel*. Incluye el sistema eléctrico y el sistema diésel.
- AOI 10. *Large screen overview: lower row of the operator's screens*. Se emplea cuando el operador selecciona la pantalla de gran tamaño en la fila inferior de pantallas.
- AOI 11. *Trends in the trend overview screen*. Se refiere a las curvas de tendencias de la pantalla de visión general de tendencias.
- AOI 12. *Values in the trend overview screen*. Se refiere al valor dinámico del parámetro situado en el lado derecho de la pantalla de visión general de tendencias.
- AOI 13. *Automation (automatic control systems) overview screen*. Comprende toda la pantalla de automatización.
- AOI 14. *ALDIV system screen*. Incluye el sistema ALDIV.
- AOI 15. *TAG of the alarm list overview screen*. Comprende el código identificador (*tag*) del mensaje de la alarma en la lista de alarmas.
- AOI 16. *Alarm message text in the alarm list overview screen*. Se refiere al texto del mensaje de la alarma en la lista de alarmas.
- AOI 17. *Alarm value in the alarm list overview screen*. Incluye el valor de la alarma y el valor límite del mensaje de alarma en la lista de alarmas.
- AOI 18. *Time and other alternatives in the alarm list overview screen*. Se refiere a otras partes de la lista de alarmas (el símbolo visual anunciador de la alarma, el tiempo de ocurrencia de la alarma) así como a aquellas ocasiones que resulte complicado discernir el AOI en la lista de alarmas.
- AOI 19. *Key alarm tile overview screen*. Incluye la pantalla de las alarmas mostradas en ventanillas.
- AOI 20. *Other operator's screens*. Contempla cuando un operador mira hacia las pantallas de alarmas del otro operador.
- AOI 21. *Communication between reactor operator, turbine operator and shift supervisor*. Representa la existencia de comunicación verbal entre los operadores o con el supervisor, es muy importante señalar que el área se puntúa sólo cuando el operador se gira para mantener la comunicación, es decir, cuando deja de mirar a las pantallas de su estación de trabajo.

- AOI 22. *NORS, screen 4 / 1*. Se emplea para el formato del proceso NORS mostrado en la pantalla *prosit* 0 del operador de reactor o en la pantalla *brille* 1 del operador de turbina⁴⁹.
- AOI 23. *NORS, screen 3 / 2*. Se emplea para el formato del proceso NORS mostrado en la pantalla *prosit* 1 del operador de reactor o en la pantalla *brille* 0 del operador de turbina.
- AOI 24. *NORS, screen 2 / 3*. Se emplea para el formato del proceso NORS mostrado en la pantalla *askepott* 0 del operador de reactor o en la pantalla *prinsen* 1 del operador de turbina.
- AOI 25. *NORS, screen 1 / 4*. Se emplea para el formato del proceso NORS mostrado en la pantalla *askepott* 1 del operador de reactor o en la pantalla *prinsen* 0 del operador de turbina.
- AOI 26. *Anything else or not specified*. Se incluyen otras áreas a las que mira el operador, que no están contempladas en el resto de las AOI, siendo principalmente las actuaciones de los operadores en el teclado y en el ratón, así como las conversaciones telefónicas. En el área no especificado se han incluido las fijaciones realizadas por los operadores durante:
 - a. Las actuaciones manuales sobre los componentes de la interfaz, que incluye, entre otros, arrancar o parar una bomba, abrir o cerrar una válvula, aislar partes o sistemas del proceso, introducir valores numéricos en el teclado para regular el caudal de una válvula o la potencia de las turbinas.
 - b. La selección de las pantallas del proceso NORS, de las curvas de tendencias, del sistema ALDIV, de la pantalla de visión general de gran tamaño.
 - c. La selección del teclado sensible al tacto en las cuatro pantallas de la fila inferior de la estación de trabajo de cada operador.
 - d. Las acciones realizadas en el teclado para reconocer, comprimir y silenciar las alarmas.
 - e. Las conversaciones telefónicas con personal externo a la sala de control (rondistas, instrumentistas, centro de emergencias, brigada de incendios, etc.).
 - f. Un movimiento rápido de cabeza del operador, sin llegar a fijarse en un área determinada.
 - g. La ausencia de la cruz blanca que señala el punto de la fijación en la pantalla.
 - h. Cuando un operador mira a las pantallas del otro operador, excepto las pantallas del sistema de alarma que han sido incluidas en el AOI 20.
 - i. La atención del operador centrada en el aparato de seguimiento de movimientos oculares.
- AOI 27. *Read or check procedure*. Se refiere al uso de los procedimientos de operación.
- AOI 28. *Verify if is using procedures*. Refleja la opción de verificar, posteriormente, empleando las cintas QUAD, si el operador está leyendo los procedimientos.
- AOI 29. *Trends in any trend screen*. Se refiere a las curvas de tendencias de las pantallas de tendencias seleccionadas en la fila inferior.
- AOI 30. *Values in any trend screen*. Se refiere al valor dinámico del parámetro situado en el lado derecho de las pantallas de tendencias, que han sido seleccionadas en la fila inferior.

9.4.2.1.2 Disposición de las áreas de interés en el teclado sensible al tacto

La distribución de las áreas en el teclado sensible al tacto se realizó teniendo en cuenta el tipo de información (en la parte superior están situadas las AOI correspondientes a la información de

⁴⁹ Ambos operadores pueden seleccionar cuatro pantallas en la fila inferior, en el caso de seleccionar formatos del proceso, se van a denominar en la presentación de resultados: NORS 1, NORS 2, NORS 3 y NORS 4. En el caso del operador de reactor, desde el ángulo de visión del operador, la pantalla 1 es la situada a la derecha y la pantalla 4 está en el lado izquierdo. Para el operador de turbina es lo opuesto, es decir, la pantalla 1 se presenta a su izquierda, mientras que la pantalla 4 está ubicada a su derecha.

visión general, a excepción de ALDIV) y el posible uso de las AOI (en la parte derecha del teclado están incluidas las AOI que más se emplearán. La excepción es AOI 26).

En la figura 9-2 se muestra la disposición de las treinta AOI en el teclado sensible al tacto para la puntuación de los datos.

CFMS AOI 1	Volume Boric AOI 2	Reactor Primary AOI 3	Secondary AOI 4	Overview Others AOI 5		Overview Trend. Trend AOI 11	Overview Trend. Value AOI 12
Plant protection AOI 6	Emergency AOI 7	Power balance AOI 8	Electrical Diesel AOI 9	LS in lower row AOI 10			
Automation Overview AOI 13	ALDIV AOI 14			Alarm List Tag AOI 15	Alarm List Text AOI 16	Alarm List Value AOI 17	Alarm List Others AOI 18
			Alarm Tile AOI 19				
Other operator screens AOI 20	Communica- tion AOI 21			NORS Screen 4 AOI 22	NORS Screen 3 AOI 23	NORS Screen 2 AOI 24	NORS Screen 1 AOI 25
Not specified AOI 26		Procedure AOI 27	Check procedure AOI 28			Trend. Trend AOI 29	Trend. Value AOI 30

Figura 9-2. Disposición de las áreas de interés en el teclado sensible al tacto en el estudio principal.

9.4.2.2 Escenarios

Con el objetivo de analizar el impacto de la automatización en la operación, se desarrollaron escenarios que variaban en dos dimensiones: el tipo de automatización y el nivel de complejidad (Hollangel y Miberg, 1999). En escenarios con automatización extensa, hay situaciones en donde la actuación del operador origina una activación extensa de la automatización, mientras que, en la automatización limitada, la actuación del operador se lleva a cabo, en gran parte, sin la activación de la automatización. En cuanto al nivel de complejidad, los escenarios de tipo diagnóstico se caracterizan por implicar un deterioro progresivo de las condiciones de planta, en donde el operador necesita desarrollar un conocimiento independiente del fallo para llevar a cabo las acciones correctoras (Hollangel y Miberg, 1999).

Se han analizado tres escenarios del experimento de automatización: el escenario 1 de disparo erróneo del reactor, el escenario 2 de disparo de una turbina y fuga de vapor y el escenario 3 relativo al enfriamiento no intencionado y una fuga en el colector de las bombas del agua de alimentación. En la tabla 9-5, se incluyen las principales características, en cuanto al tipo de automatización y al nivel de complejidad, de los tres escenarios (Hollangel y Miberg, 1999).

Tabla 9-5. Principales Características de los Escenarios (Hollangel y Miberg, 1999)

Nivel de Complejidad	Tipo de automatización	
	Limitada	Extensa
Alta	Escenario 3	Escenario 1
Baja	Escenario 2	

9.4.2.2.1 Descripción de los escenarios

Los escenarios empleados en el estudio están descritos en esta sección. En la descripción de cada escenario se detalla el tiempo de activación de las anomalías⁵⁰ y se proporciona información sobre el operador implicado en las acciones correctoras en cada transitorio, la actuación ideal de los operadores ante las anomalías y el riesgo de errores del equipo de operación, todo ello fue identificado por expertos en el proceso NORS para el experimento de automatización.

Un transitorio en una central nuclear es cualquier variación temporal significativa respecto al valor nominal estable de uno o más parámetros importantes de operación, como puede ser la temperatura y presión en diversos puntos del sistema, el nivel de potencia o el caudal de refrigerante (Tanarro y Tanarro, 2008). En cada escenario se han introducido una serie de transitorios, cuyo objetivo es manipular el grado de complejidad del escenario, lo que influirá en la detección y el diagnóstico del equipo de operación sobre la situación de la planta. La combinación de transitorios en los escenarios 1 y 3 da lugar a una elevada complejidad.

Las principales pantallas del simulador (lista de alarmas, alarmas en ventanilla, pantalla general de gran tamaño, tendencias y formatos del proceso) para la detección de las anomalías por los operadores han sido identificadas a partir de la información disponible en el simulador NORS de HAMMLAB y mediante la revisión de las cintas de vídeo y de los registros del simulador. Es importante mencionar que todas las alarmas están siempre visibles en los formatos del proceso NORS. Además, el transitorio que incluye un mensaje de alarma en el sistema de alarma CASH se considera, a priori, más fácil de detectar, al disponer los operadores de alarmas que explicitan la anomalía, esta es una de las hipótesis a analizar.

9.4.2.2.1.1 Escenario 1: disparo erróneo del reactor

En el escenario de disparo erróneo del reactor se introdujo un nivel elevado de complejidad y un nivel alto de automatización. En la tabla 9-6 se incluye la situación inicial de la planta en el escenario 1.

Tabla 9-6. Situación Inicial de la Planta en el Escenario 1

Situación de la planta	
Presión del vapor	44,6 bar
Potencia eléctrica	2x230 MW
Potencia del reactor	Plena potencia (97,4%)
Presión del reactor	123,8 bar
Nivel del presionador	4,48 m
Concentración de boro	4,3 g/kg
Bomba RL91D001 de agua de alimentación	En reparación

En el escenario 1, de disparo erróneo del reactor, se introducen un total de cinco anomalías, en el orden cronológico expuesto a continuación.

⁵⁰ El tiempo de ocurrencia de la introducción de la anomalía es genérico, puesto que es necesario incorporarlo manualmente por el instructor en cada transitorio del escenario. Esto puede ocasionar fluctuaciones de unos segundos entre los seis equipos de operación. Además, algunos de los transitorios se introducen en función de las acciones realizadas por el equipo de operación en la gestión de transitorios previos, cuyo momento temporal puede diferir, puesto que, habitualmente, las anomalías anteriores están diseñada para originar un posible efecto de enmascaramiento.

- Transitorio 1: la bomba RL91D001 del agua de alimentación está en reparación. En el minuto 7, se produce el disparo de la bomba del agua de alimentación RL22D001⁵¹, por lo que la potencia de las turbinas disminuye y la potencia del reactor se sitúa alrededor del 82%.

El operador de turbina observará la indisponibilidad de la bomba del agua de alimentación y también la disminución de potencia. El operador debería comprobar que la potencia disminuye, atendiendo al controlador de la turbina y al controlador del reactor, empleando, por ejemplo, una curva de tendencias.

El operador de turbina puede emplear las dos pantallas del sistema de alarma (lista y ventanilla) y la pantalla de visión general de gran tamaño. Se anuncia, al operador de turbina, la alarma *RL22D001B42 “FEEDWATER PUMP RL22: TRIP”*.

- Transitorio 2: disparo del reactor (*scram*) erróneo originado por el fallo de componentes, en el minuto 9

El equipo debería seguir el procedimiento de primer control después del disparo (o parada rápida) del reactor.

El disparo del reactor y los disparos de las dos turbinas se pueden observar en las pantallas de alarmas (lista y ventanilla) y en la pantalla de visión general de gran tamaño. Se muestra al operador de reactor la alarma *YZ10U404U01 “REACTOR YZ10: SCRAM”*. También se presentan las alarmas *SA00U301U03 “TURBINE 10: TRIP”* y *SA00U301U04 “TURBINE 50: TRIP”* al operador de turbina.

- Transitorio 3: fallo (apertura) en la válvula de alivio seguridad RA13S001 del generador de vapor YB13⁵² en el minuto 10:30.

El operador de turbina debería atender al estado de la válvula de alivio seguridad RA13S001 e intentar cerrarla. Puesto que no resulta posible cerrarla, el equipo de operación tendrá que parar la bomba del refrigerante del reactor (YD13D001), cerrar la válvula de la rama fría (YA13S001) y aislar el generador de vapor YB13 en las líneas de vapor (como RA13S001, RA13S003 y RY13S001) y de agua de alimentación (como RL33S001 y RL43S001 y RL83S001).

Puede emplear para detectar la anomalía las pantallas de alarmas (lista y ventanilla) y la pantalla de visión general de gran tamaño. Se anuncia la alarma *RA13S001B02 “STEAM RELIEF VALVE RA13: NOT CLOSED”* al operador de turbina.

Hay riesgo de que el operador de turbina olvide atender a la válvula de la rama fría y, como consecuencia, se produzca un enfriamiento del reactor.

- Transitorio 4: en el minuto 15 se origina una pequeña fuga (o rotura) en la válvula de aislamiento (válvula de recirculación) YA13S001 del circuito primario en el lazo 13.

El operador de reactor deberá atender a la presión de la contención, el nivel del presionador y el sistema de control de volumen. Debería concluir que existe una fuga en el sistema principal del refrigerante. Puesto que la fuga no se puede aislar, el operador deberá iniciar el enfriamiento de la planta, arrancando el programa de boro.

⁵¹ El sistema de agua de alimentación de NORS consta de cinco bombas, cuatro funcionando normalmente y una bomba en reserva, existiendo también otras dos bombas de emergencia.

⁵² Las válvulas de alivio de los generadores de vapor limitan la presión del sistema secundario, permitiendo la liberación de vapor (venteando) al exterior (a la atmósfera).

Aunque no existe una alarma que indique la fuga, se presentan varias alarmas relacionadas con el incremento de la presión y el nivel de la contención (por ejemplo, *TL22P009P52 “CONTAINMENT LEVEL 10 TL22: PD LO”* y *TL90P760U01 “CONTAINMENT TL90: P HI”*), que son relevantes para el diagnóstico del transitorio. Además, se muestra información relevante en otras partes de la interfaz: la pantalla de visión general de gran tamaño o los formatos del proceso NORS XX00 e YP00.

Existe un alto riesgo de que el operador no identifique la fuga, al ser pequeña. Si el operador no hubiera cerrado anteriormente la válvula de la rama fría YA13S001 del generador de vapor YB13, entonces se produciría un enfriamiento del reactor. Esta combinación enmascararía la fuga, puesto que el nivel del presionador disminuiría debido al enfriamiento y a la fuga.

- Transitorio 5: disparo de la bomba de gran capacidad de boro TB11D001⁵³, aproximadamente dos minutos después de que el operador arranque el aporte de boro (boración).

El operador de reactor deberá arrancar el programa de boro y comprobar que se han llevado a cabo todos los pasos. El operador de reactor tiene que notar la parada de la bomba del sistema de aporte y purga TK11D001 así como que no existe riesgo de dilución. El equipo continuará enfriando la planta, no obstante, la anomalía en la bomba de gran capacidad de boro complicará esta tarea.

El operador de reactor puede emplear las dos pantallas de alarmas (lista y ventanilla) y la pantalla de visión general de gran tamaño. Se presenta al operador de reactor la alarma *TB11D001B42 “HIGH CAP BORON PUMP TB11: TRIP”*.

Existe riesgo de que el operador de reactor no se dé cuenta del disparo de la bomba de boro debido a una sobrecarga mental ocasionada por los transitorios previos, fundamentalmente, por la fuga de pequeño tamaño en el primario.

9.4.2.2.1.2 Escenario 2: disparo de una turbina y fuga de vapor

En el escenario de disparo de turbina y fuga de vapor se introdujo un nivel limitado de automatización y una complejidad baja. En la tabla 9-7 se incluye la situación inicial de la planta en el escenario 2.

Tabla 9-7. *Situación Inicial de la Planta en el Escenario 2*

Situación de la planta	
Presión del vapor	44,5 bar
Potencia eléctrica	2x230 MW
Potencia del reactor	Plena potencia (97%)
Presión del reactor	123,6 bar
Nivel del presionador	4,59 m
Concentración de boro	4,4 g/kg

En el escenario 2 de disparo de una turbina fuga de vapor se introducen tres anomalías.

⁵³ La concentración de boro en el refrigerante (agua) del primario se modifica para compensar los cambios lentos de la reactividad del núcleo y para controlar la potencia. Existen dos tipos de bombas en el sistema de boro, aquellas que bombean en el lado de succión de las bombas de TK –hay una bomba de gran capacidad TB11D001 y una bomba de baja capacidad TB13D001 – y las que bombean la solución de boro en el lado de presión de las bombas de TK –dos bombas de alta presión TB12D001 y TB22D001–.

- Transitorio 1: en el minuto 6 se produce una alarma falsa (*trap alarm*) en el sistema de detección de fugas.

El operador de reactor debería detectar la falsa alarma en el sistema de alarma. Después tendría que elegir el formato del proceso NORS TKTE para obtener una información más detallada de la parte de la planta afectada. El operador debería encargar al operador sobre el terreno la comprobación in situ, fuera de la sala de control, de la alarma.

El operador de reactor puede emplear el sistema de alarma, la lista de alarmas y las alarmas en ventanilla, para detectar. Se muestra la alarma *TZ03K406G01 “TRAP AUX BUILDING -0.15M TZ03: L MAX”*.

- Transitorio 2: en el minuto 10 se produce el disparo de la turbina SA50.

El disparo de turbina causa que muchos programas paren automáticamente, y la disminución de la potencia del reactor, que se estabilizará en torno al 50%. Después de que el operador detecte el disparo de la turbina tiene que seguir una parte del procedimiento de primer control después del disparo del reactor.

El operador de turbina puede detectar en las pantallas del sistema de alarma (alarmas en ventanilla y alarmas en lista) y en la pantalla de visión general de gran tamaño. Se anuncia al operador de turbina la alarma *SA00U301U04 “TURBINE 50: TRIP”*.

- Transitorio 3: en el minuto 11 se produce una fuga en la línea de vapor fuera de la contención en el lazo RA52.

El equipo tiene que observar el desequilibrio en los controladores de los generadores de vapor. El operador de turbina debería darse cuenta de la diferencia entre el caudal de entrada (agua) y de salida (vapor), empleando formatos como la pantalla de visión general de gran tamaño o una ventana que se puede abrir en la parte inferior del formato del proceso NORS YB00. También podría seleccionar el formato del proceso NORS YB00, para percibir la diferencia de caudal de los generadores de vapor. A continuación, el operador de reactor tiene que hacer un disparo manual del reactor, diversos sistemas automáticos paran automáticamente, el equipo comenzará el aislamiento del generador de vapor YB52 siguiendo el procedimiento de fuga en el lado secundario. Por último, hay que arrancar el aporte de boro y comenzar a enfriar la planta.

El operador de turbina puede emplear para detectar la pantalla de visión general de gran tamaño, el formato del proceso NORS YB00 y las curvas de tendencias. No hay una alarma específica que indique la fuga en la línea de vapor.

Existe riesgo de que el operador de turbina no se dé cuenta, a tiempo, de la diferencia de caudal, puesto que tiene que comparar datos de medidas del caudal del agua de alimentación y del vapor. Además, si el operador descubre la anomalía demasiado tarde, se originarán daños importantes en la planta: la pérdida parcial del agua de alimentación y el enfriamiento.

9.4.2.2.1.3 *Escenario 3: enfriamiento no intencionado y una fuga en el colector de las bombas del agua de alimentación*

En el escenario de enfriamiento y fuga en el colector de las bombas del agua de alimentación se introdujo un nivel elevado de complejidad y un nivel limitado de automatización. La situación inicial de la planta en el escenario 3 está descrita en la tabla 9-8.

Tabla 9-8. *Situación Inicial del Proceso en el Escenario 3*

Situación de la planta	
Presión del vapor	50,6 bar
Potencia eléctrica	0 MW
Potencia del reactor	<i>Subcrítico</i> . Insertadas todas las barras de control
Presión del reactor	123,4 bar
Nivel del presionador	3,02 m
Concentración de boro	4,5 g/kg
Válvula de rociado YP11S001	Abierta por error

En el escenario 3 de enfriamiento no intencionado y una fuga en el colector de las bombas del agua de alimentación se introducen cinco anomalías.

- Transitorio 1: inicialmente en el escenario existe la anomalía de la válvula de rociado YP11S001 abierta en la línea de enfriamiento del presionador⁵⁴, es un error humano del turno anterior. Tres de los siete grupos de calentadores del presionador, en concreto YP10W500, YP10W600 y YP10W700⁵⁵, están desconectados.

El operador de reactor deberá establecer una visión global del estado de la planta por medio de la pantalla de visión general de gran tamaño y por los formatos del proceso NORS. El operador tendría que darse cuenta, en el formato del proceso NORS YP00, que la válvula de rociado YP11S001 está abierta y, puesto que no resulta posible cerrarla, debería enviar al operador sobre el terreno a cerrarla in situ.

El operador de reactor puede emplear la pantalla de visión general de gran tamaño para obtener una visión general de la planta y detectar la posición de la válvula en el formato del proceso NORS YP00. No existe una alarma que indique directamente la anomalía.

Existe riesgo de que el operador de reactor no preste atención al estado de la válvula YP11S001 y, posteriormente, se produzca un inesperado enfriamiento del proceso cuando abra, por fallo del componente, la válvula YP11S003 (transitorio 2).

- Transitorio 2: en el minuto 10 se produce erróneamente (fallo de componente) la apertura de la válvula YP11S003 en la línea de rociado para el enfriamiento del presionador.

Cuando el operador se dé cuenta de la disminución en la presión del reactor, debería detectar la apertura de la válvula YP11S003. El operador tendrá que cerrar las válvulas YP11S003 y YP11S001 en el formato del proceso NORS YP00 y, puesto que no es posible, solicitará al operador sobre el terreno el cierre manual de las válvulas de la línea de rociado.

El operador de reactor puede emplear el formato del proceso NORS YP00. También puede detectar la presión del reactor en la pantalla de visión general de gran tamaño y en los diagramas de tendencias. No existe una alarma que indique directamente la anomalía, aunque surgen alarmas relacionadas con el sistema del presionador, como YP10T808P52 “PRESSURIZER YP10: TG LO”, YP10W300R02 “PRZ HEATER GROUP 3 YP10: ON” o YA13P901U52 “PRIM CIRC YA13: P LO”.

⁵⁴ En operación normal, en el presionador hay agua y vapor en condiciones de saturación. El sistema de rociado de agua del presionador procede de las ramas frías por los lazos YP13 e YP14. Ante el aumento de la presión, el sistema de aspersión, o rociado, descarga agua relativamente fría en la parte superior del presionador, por lo que se condensa parte del vapor del presionador.

⁵⁵ Los calentadores de inmersión calientan el líquido del presionador para aumentar la presión. Entran en funcionamiento para compensar las disminuciones de presión mediante la vaporización controlada de agua en el presionador. Se emplean para compensar el efecto del rociado continuo y de las fugas de calor.

El operador de reactor podría no darse cuenta de la disminución de la presión, si está concentrado en otros problemas (situación de alta carga de trabajo). En caso de no detectarlo, la apertura de la válvula de la línea de rociado podría ocasionar una reducción del margen de ebullición y, consecuentemente, un riesgo de ebullición.

- Transitorio 3: en el minuto 15, se introduce por error la apertura de la válvula de baipás de turbina RC51S003 (fallo de componente)⁵⁶. Por otro lado, no se puede cerrar la válvula de parada (*shut valve*) RC51S001, puesto que está agarrotada (atascada) en posición de apertura, por fallo del componente.

Debido a un fallo latente en la válvula de parada de la línea de baipás RC51S003, la apertura originará la disminución de la presión del colector. El operador deberá atender a la pantalla de visión general de gran tamaño y a formatos del proceso NORS y, al darse cuenta de la existencia de problemas en la válvula de baipás, tendrá que intentar cerrar la válvula empleando los formatos del proceso NORS RC95 o SD50. Puesto que no se puede cerrar desde la sala de control, el operador solicitará, al operador sobre el terreno, el cierre manual de la válvula.

El operador de turbina para detectar puede emplear la pantalla de visión general de gran tamaño y los formatos del proceso NORS RC95 o SD50. No hay una alarma que indique la apertura de la válvula de baipás de la turbina.

Existe la posibilidad de que el operador de turbina no detecte el estado de la válvula de baipás de la turbina debido a una alta carga de trabajo. Si no percibe el estado de la válvula, existe un elevado riesgo de que descienda el nivel del presionador, se origine un enfriamiento rápido, arranque la bomba de inyección de seguridad.

- Transitorio 4: en el minuto 20, se produce fuera de la contención una fuga en el colector de presión de la bomba del agua de alimentación RL20.

El operador de turbina tendrá que observar, en la pantalla de visión general de gran tamaño, la diferencia del caudal total de las bombas del agua de alimentación y del caudal total hacia el generador de vapor. Entonces debería darse cuenta de que el nivel de los tanques de agua de alimentación está descendiendo, empleando, por ejemplo, las curvas de tendencias. El operador tendría que identificar la fuga e intentar aislarla.

El operador de turbina puede obtener información relacionada con el transitorio en la pantalla de visión general de gran tamaño, las curvas de tendencias y los formatos del proceso NORS RL00, RQ00 o RV00. No existe una alarma asociada directamente con la anomalía, pero se muestran, al operador de turbina, alarmas relacionadas con el sistema de agua de alimentación, tales como *RL20P002P52 "FEEDWATER MANIFOLD RL20: P LO"*, *RL60P002P52 "FEEDWATER MANIFOLD RL60: P LO"* y *RL91D001B42 "STANDBY FW PUMP RL91: TRIP"*.

Existe un riesgo elevado de que el operador de turbina no detecte la fuga, porque la apertura errónea de la válvula de baipás de turbina RC51S003 origina cambios en el nivel de los tanques del agua de alimentación, que dificultarán la identificación de la anomalía.

- Transitorio 5: aproximadamente en el minuto 20:30 se produce una alarma de incendio.

⁵⁶ El baipás de turbina se emplea para derivar el vapor principal directamente al condensador, sin pasar por la turbina.

El operador de turbina debería solicitar al operador sobre el terreno la comprobación de la causa de la alarma de incendio. Entonces el operador sobre el terreno informará de la ubicación de la fuga, puesto que en la sala de control de la central de Loviisa tienen acceso a la información. No hay fuego, sino que la alarma es debida a la activación de los detectores de alarma por agua caliente.

El operador de turbina puede emplear las pantallas de alarma (lista y ventanilla) y la pantalla de visión general de gran tamaño. Se muestra la alarma *MF00K001G01 "FIRE ALARM CENTRE MF00:"* al operador de turbina, con anunciación auditiva diferente de las otras alarmas.

Existe el riesgo, para el operador de turbina, de no encontrar la relación entre la alarma de incendio y la fuga, en la situación de no haber detectado previamente la fuga.

9.4.2.2.2 Orden de presentación de los escenarios

El orden de presentación de los escenarios, a los seis equipos de operación, se muestra en la tabla 9-9 (adaptada de Miberg, 1998b). La secuencia de los escenarios diagnósticos se controló por contrabalanceo con la técnica de cuadrados latinos, de forma que los escenarios no se llevaron a cabo en la misma secuencia por todos los turnos de operación (Hollnagel y Miberg, 1999).

Tabla 9-9. Orden de Presentación de los Escenarios (Miberg, 1998b)

Equipo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Equipo 1	Tercero	Primero	Segundo
Equipo 2	Segundo	Primero	Tercero
Equipo 3	Primero	Tercero	Segundo
Equipo 4	Segundo	Tercero	Primero
Equipo 5	Segundo	Primero	Tercero
Equipo 6	Primero	Tercero	Segundo

En este estudio se va a explorar si el orden de presentación de los escenarios ha podido influir en los resultados, puesto que, aunque en el experimento inicial, el orden fue balanceado con cuadrados latinos, el diseño original cubría cuatro escenarios, mientras que hemos abordado tres escenarios.

9.4.2.2.3 Criterios para la puntuación de datos en los escenarios

La duración o permanencia en las AOI se calcula por el tiempo transcurrido en pasar de un AOI a la siguiente (Skraaning y Drøvoldsmo, 1998). Para puntuar los datos de movimientos oculares, cada vez que el operador acceda a un AOI, el evaluador tiene que presionar en el teclado sensible al tacto el botón del AOI y, cuando el operador deje de atender al AOI, pulsará el botón correspondiente a la nueva AOI donde mire el operador. Con este procedimiento quedan recogidas, de forma secuencial, todas las AOI a las que acceden los operadores.

Para una correcta puntuación de los datos de movimientos oculares, con el *software* EyeCon, se realizó al 0,5 de la velocidad real, al igual que en Drøvoldsmo et al. (1998). Al visionar las cintas de seguimiento de movimientos oculares, se puede escuchar la audición de los operadores (en finlandés) o del experto en proceso (desde la galería experimental explicaba, a tiempo real, las acciones principales de los operadores así como la comunicación del turno sobre la situación de la planta). No obstante, la audición de las cintas de vídeo sólo funcionaba con una velocidad de, al menos, 70% del tiempo real. Por consiguiente, cada escenario se visionaba en una segunda ocasión

para recoger información adicional, como las explicaciones del experto sobre el estado del proceso, la anunciación de nuevas alarmas, o la fuente de información empleada por el operador para detectar.

Por otro parte, se han definido unos períodos temporales dentro de cada escenario, que permiten focalizar el proceso de puntuación y de análisis en determinadas etapas del escenario. Estos períodos se denominan *tiempos ventana*.

En cada escenario se han aplicado tres criterios:

1. Iniciar la puntuación entre un minuto y medio y dos minutos antes de la primera alarma del transitorio inicial. Representa la etapa de monitorización en una situación de operación normal.
2. Puntuar desde la primera alarma que surja en el primer transitorio hasta unos minutos después de que se introduzca la alarma significativa del último transitorio. Ha sido determinado para cada escenario en función del desarrollo de los transitorios. Se han establecido períodos equivalentes para todos los equipos durante el mismo escenario. Cubre las etapas de detección, análisis de la situación, toma de decisiones y solución de problemas.
3. Puntuar siempre cuando el operador mire al sistema de alarma (pantalla de alarmas en ventanilla o pantalla de lista de alarmas), incluso cuando se trate de períodos previos o posteriores a los tiempos ventana.

La aplicación de los criterios se concretó en el escenario 1 con un tiempo ventana desde 5:30 hasta 35:00 (29 minutos y medio). En el escenario 2, el tiempo ventana es desde 4:00 hasta 30:00 (26 *min*). En el escenario 3, el tiempo ventana abarca desde 8:00 hasta 35:00 (27 *min*). Estos constituyen, por tanto, los minutos de cada escenario en qué se puntúan las 30 AOI y las 12 AOI de la interfaz.

Destacar que, en cambio, las cinco AOI de las alarmas se puntúan durante los 45 minutos del tiempo total de cada escenario.

9.4.2.3 Acciones de gestión de la alarma

Las acciones posibles para manejar las alarmas, silenciar, reconocer y comprimir, han sido objeto de análisis estadísticos, comparando la cantidad de acciones de cada tipo. Los operadores pueden reconocer y comprimir todas las alarmas de forma global, o solamente las alarmas de su puesto, primario o secundario, lo que también ha sido analizado.

9.4.2.4 Rol del operador

El equipo de operación estaba compuesto por tres miembros: supervisor, operador de reactor y operador de turbina. Las responsabilidades y las tareas asignadas a los miembros del equipo de operación en el experimento se describen en la tabla 9-10.

Tabla 9-10. *Responsabilidades y Tareas del Equipo de Operación*

Responsabilidades	Tareas
Supervisor	<ul style="list-style-type: none"> – Todas las operaciones realizadas en la sala de control. – Asegurar que los parámetros del proceso se encuentran dentro del rango permisible. – Decisiones tácticas y estratégicas. – Informar en situaciones de emergencia al ingeniero de turno de qué ha sucedido, qué ha causado o está causando las desviaciones, cómo se están afrontando y cómo se manejará la situación. – Coordinación de la actividad en la sala de control.

Responsabilidades	Tareas
Operador de reactor	<ul style="list-style-type: none"> – Las operaciones en el circuito primario. – Monitorizar la situación del primario y notificar al supervisor las desviaciones del estado normal. – Informar al operador de turbina sobre los cambios en el primario que influyen en el secundario. – Asegurar que el supervisor ha aprobado todas las operaciones en el primario que implican el cambio de estado.
Operador de turbina	<ul style="list-style-type: none"> – Las operaciones en el circuito secundario. – Monitorizar la situación del secundario y notificar al supervisor las desviaciones del estado normal. – Informar al operador de reactor sobre los cambios en el secundario que influyen en el primario. – Asegurar que el supervisor ha aprobado todas las operaciones en el secundario que implican el cambio de estado.

En el estudio, los supervisores de turno no emplearon el equipo de seguimiento de movimientos oculares. No se espera encontrar diferencias estadísticamente significativas en el número de accesos visuales (frecuencia) ni en la cantidad de tiempo asignado (duración) al sistema de alarma dependiendo del puesto del operador, reactor o turbina. Esta pregunta de investigación va a ser explorada inicialmente.

9.5 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL: APARATOS EMPLEADOS EN EL EXPERIMENTO

El experimento se llevó a cabo en el simulador NORS del laboratorio HAMMLAB. En este apartado se describe, el simulador NORS, el laboratorio HAMMLAB y los equipos de recogida y de análisis de datos experimentales.

9.5.1 Simulador NORS

La descripción incluida en el apartado del simulador NORS ha sido extraída principalmente de Førdestrømmen y Kvaem (1996), empleando también información de Leikkonen (1983) y de Marshall, Baker y Leikkonen (1985).

El simulador PWR NORS a escala total, o escala real, se incorporó en HAMMLAB en 1983. El simulador se desarrolló en cooperación entre *Nokia Electronics* e *Imatran Voima Oy (IVO)* y el Proyecto Halden. NORS simula una central nuclear similar a la C. N. de Loviisa⁵⁷, en Finlandia, con pequeñas diferencias, se comporta de modo semejante tanto en operación normal como en anomalías. La diferencia más significativa está en la existencia de cuatro circuitos en el primario en NORS frente a los seis circuitos existentes en la C. N. de Loviisa y, también, que el núcleo del reactor NORS es del tipo alemán *KWU (KraftWerk Union)*, mientras que en la planta de referencia es del tipo ruso *VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor)*.

⁵⁷ Una fotografía del simulador de formación de la C. N. de Loviisa en Finlandia se puede encontrar en Sebok (2000, p. 1218), es una réplica de la sala de control de la planta. La interfaz de la sala de control es híbrida, ya que consta de controles y displays convencionales integrados con tecnología avanzada; los operadores se sientan distanciados varios metros entre sí y, frecuentemente, necesitan moverse en la sala de control para leer los indicadores y observar el estado de la planta (Sebok, 2000).

El modelo de planta simula un reactor PWR de agua ligera tipo VVER con dos trenes paralelos de agua de alimentación y de turbinas, con cuatro generadores de vapor (referirse a Leikkonen (1983) para una descripción más detallada del proceso). El modelo es muy similar al modelo de planta empleado en el simulador de formación de IVO de la C. N. de Loviisa, e incluye todos los sistemas que pueden ser operados bajo condición normal y de accidente. El simulador dispone de un gran número de componentes individuales y permite simular un amplio rango de escenarios, por lo que tiene suficiente alcance para proporcionar las características operativas reales.

9.5.1.1 Descripción genérica del funcionamiento de un reactor de agua a presión

En un reactor PWR, dentro del edificio de contención están los componentes del sistema del reactor: la vasija del reactor, los generadores de vapor, las bombas de refrigeración del reactor y un presionador. El núcleo del reactor se encuentra dentro de la vasija, por la que circula agua bajo presión, que hace de moderador y de refrigerante, lleva la energía desprendida en el núcleo del reactor (extrae el calor generado por la reacción nuclear), por medio de las tuberías de los lazos de refrigeración, hacia intercambiadores de calor (generadores de vapor) que están a menor presión que la vasija, donde cede el calor extraído del núcleo al refrigerante del sistema secundario. A la salida del generador de vapor de cada lazo, el agua es impulsada por una bomba centrífuga de nuevo hacia la vasija. Un presionador, conteniendo líquido y vapor en saturación, mantiene el agua del primario a alta presión, para conseguir elevadas temperaturas sin entrar en ebullición. Los generadores de vapor transfieren el calor producido en el núcleo desde el sistema primario al secundario. El vapor generado alimentará al grupo turbina-generator, produciendo electricidad que se envía al parque de transformación y a la red eléctrica. La condensación del vapor se lleva a cabo a través del circuito de refrigeración exterior (pantano, río o mar) de modo que el vapor que circula por el exterior de los tubos del condensador se condensa al enfriarse y es enviado, de nuevo, al generador de vapor (Tanarro y Tanarro 2008; Westinghouse Electric Corporation, 1973; Westinghouse Nuclear Española, 1983).

Algunas características específicas de los reactores PWR son que las barras de control están situadas en la parte superior de la vasija y se insertan por gravedad, la existencia de generadores de vapor, que son intercambiadores de calor de carcasa y tubos, donde se produce la transmisión de calor entre el circuito primario (lado de tubos) y secundario (lado de carcasa) y la ebullición del refrigerante secundario, suministrado en forma líquida por los sistemas de agua de alimentación con el fin de producir el vapor a alta presión, que impulsa la turbina. Constituye el foco frío o sumidero de calor del sistema primario durante la operación normal, la parada caliente y la fase inicial del enfriamiento a parada fría, con distinto aporte de agua de alimentación para cada caso. También permite extraer los excesos de calor producidos en el sistema primario en condiciones anormales o de accidente mediante la actuación de las válvulas de alivio y seguridad asociadas (Westinghouse Electric Corporation, 1973; Westinghouse Nuclear Española, 1983).

9.5.1.2 Principales características del proceso de la planta simulado en PWR NORS

La potencia térmica nominal del reactor es de 1425 MW, la potencia eléctrica es de 450 MW, la presión del primario es de 123 bares y la presión de vapor del secundario está entre 45 y 50 bares.

El caudal de cada uno de los cuatro lazos del primario es aproximadamente 2000 Kg/s, con temperaturas de entrada (rama fría)⁵⁸ y salida (rama caliente), a plena potencia, de 265°C y 295°C respectivamente. En el secundario, el caudal del agua de alimentación y del vapor es de aproximadamente 800 Kg/s, con temperaturas de 215°C y 255°C respectivamente, a plena potencia.

En el simulador NORS, las partes principales del sistema primario son el reactor, el presionador y cuatro lazos, en paralelo, por los que circula el agua que refrigera el núcleo, cada lazo consta de una bomba principal de recirculación y de un generador de vapor. Dentro de la vasija del reactor se encuentra el núcleo del reactor, que es la parte del reactor donde se alojan los elementos de combustible y las barras de control rodeados del moderador. El presionador, que controla la presión del primario, está conectado por la parte inferior a la rama caliente de los lazos YA13 e YA14.

Al primario están conectados, además, varios sistemas auxiliares, entre otros, el sistema de boro, el sistema de aporte y purga, los sistemas de seguridad, como el sistema de inyección de agua o los sistemas rociadores.

En el sistema secundario, el vapor generado por los cuatro generadores de vapor se distribuye a un colector común de vapor, desde donde se dirige a dos sistemas de turbinas independientes, cada uno de los cuales consta de una turbina de alta presión y de dos turbinas de baja presión. El calor residual de las turbinas de baja presión se vierte en los condensadores, en donde el vapor se convierte en condensado. Desde los dos sistemas independientes de condensadores, en donde a su vez cada uno consta de dos condensadores interconectados, el condensado se dirige, a través de dos trenes de precalentadores independientes de baja presión, a dos tanques de agua de alimentación que mantienen una gran reserva de agua (de alimentación). Desde allí, el caudal de agua de alimentación hacia las bombas de agua de alimentación pasa a través de dos precalentadores paralelos de alta presión, va a un colector común de agua de alimentación, desde donde el agua de alimentación se dirige a los cuatro generadores de vapor. Es decir, el vapor de las turbinas se condensa en agua, que vuelve a los generadores de vapor por medio del sistema de agua de alimentación. Las turbinas proporcionan energía eléctrica a la red.

El diseño de los circuitos primario y secundario ofrece una gran flexibilidad para la operación. Por ejemplo, la planta puede operar al 75% de plena potencia con sólo tres lazos en operación, al 50% con un sólo sistema de turbinas en operación (Førdestrømmen y Kvalem, 1996).

Se puede encontrar información más detallada del proceso NORS en Førdestrømmen y Kvalem (1996), Leikkonen (1983) y Marshall et al. (1985).

9.5.1.3 Principales sistemas de NORS

En NORS se han simulado aproximadamente sesenta sistemas del proceso, aunque algunos sistemas sólo están simulados parcialmente (Leikkonen, 1983, pp. 26, p. 27; Stokke y Pettersen, 1983, pp. 19-23, p. 27). Alrededor de siete sistemas del proceso no están incorporados, siendo el más importante el sistema de extracción del calor residual. Los sistemas de control y de protección de la planta (reactor, turbina, presionador, generadores de vapor) están descritos en Stokke y Pettersen (1983, pp. 24-25).

⁵⁸ En la rama caliente, el agua es transportado por las tuberías de los lazos de refrigeración desde la vasija del reactor hacia el generador de vapor, en donde se enfría unos 30°C para volver por la rama fría al reactor.

La potencia del reactor se controla por un sistema de control químico, aportando concentraciones de boro (ácido bórico) al refrigerante (controla el flujo neutrónico al ser un buen absorbente de neutrones), por medio de las barras de control, ya que la longitud de las barras de control, que se insertan en el núcleo, aumenta o disminuye la absorción de neutrones, controlando, por tanto, la variación del flujo neutrónico. La concentración de boro en el refrigerante se modifica bombeando en el refrigerante una solución de boro (boración) o agua (dilución), dejando salir una cantidad correspondiente de agua del circuito primario.

El agua del circuito primario actúa como refrigerante del núcleo. Los sistemas empleados para el tratamiento del agua del primario incluyen purificar el agua del primario (sistema TC), añadir y extraer agua, que está regulado por controladores de nivel del presionador (sistemas TK y TE), el aporte de boro y dilución (sistema TB), la inyección de agua para el sellado del eje de la bomba de refrigerante del reactor (sistema YD). La mayoría de estos sistemas funcionan automáticamente, pero el operador debe arrancarlos o pararlos.

9.5.1.4 Sistemas automáticos en NORS

El nivel de automatización del proceso NORS es muy elevado. Los sistemas automáticos del simulador se dividen funcionalmente en los sistemas de protección, los sistemas de lógica automática y los lazos de control. A nivel de componente, los sistemas automáticos utilizan parcialmente los mismos actuadores, tales como válvulas y bombas. Los sistemas de protección y lógica tienen una estructura jerárquica con los siguientes niveles: sistemas de protección, control de la planta, controles de grupo, controles de secuencia (subgrupo), controles paralelos (criterio), automatismos de cambio de bombas, automatismos de reinicio de bombas y enclavamientos (*interlocks*) de componentes.

El sistema global de protección se divide en los sistemas de reactor, turbina, generador y protección de la planta. Con la excepción de los sistemas de protección, la mayoría de los sistemas automáticos de control se pueden conectar y desconectar, permitiendo varios niveles de control manual.

Los principales grupos de controladores son de turbina, generador de vapor, agua de alimentación y presionador. El principio fundamental de control de la planta a potencia es la temperatura media del refrigerante del reactor en función de la potencia eléctrica de la turbina.

Se puede encontrar información más detallada en Førdestrømmen y Kvalem (1996).

9.5.1.5 Facilidad de uso del simulador NORS

Operadores profesionales de la central de Loviisa, que han participado en experimentos en HAMMLAB, han indicado que NORS se comporta de modo realista y aproximadamente igual que la central durante operación normal y en transitorios (Førdestrømmen y Kvalem, 1996).

Conforme a Førdestrømmen y Kvalem (1996), el rango de validez del simulador NORS en estados de operación normal de la planta es: operación a potencia entre 0-100%, parada caliente y parada fría. En estados de anomalía y accidente, hasta que sucede la ebullición en el reactor/circuito primario, o hasta que el agua de alimentación se introduce en la línea de vapor del circuito secundario, cuando uno o más generadores de vapor están llenos de agua. Si sucede una de estas dos condiciones, los modelos termohidráulicos del simulador no serán válidos. Por tanto, NORS puede simular un

amplio rango de anomalías y las fases iniciales de los estados accidentales, pero no estados posteriores con agua y vapor en el circuito primario, el núcleo del reactor descubierto, oxidación del revestimiento del combustible, generación de hidrógeno, etc.

Se puede encontrar información más detallada sobre NORS en Førdestrømmen y Kvalem (1996) y Leikkonen (1983).

9.5.2 Sala de control de HAMMLAB

La instalación experimental HAMMLAB entró en operación en 1983, estando descrita la historia de las actividades realizadas y la evolución de las instalaciones de HAMMLAB durante sus 25 años iniciales de operación en Øwre (2011).

El objetivo inicial de HAMMLAB era la realización de experimentos de interacción persona-máquina así como servir de entorno de desarrollo, prueba y evaluación de sistemas de apoyo COSS (Førdestrømmen y Kvalem, 1996). Posteriormente, el alcance fue expandido para incluir el desarrollo y la evaluación de salas de control experimentales. En 1991, HAMMLAB se trasladó a otro edificio y se estableció un nuevo laboratorio, que incluía una nueva sala de control experimental, la galería de experimentadores (denominada también de observación), una sala de ordenadores, un área de demostración y una sala para formación y entrevistas. Se utilizó el simulador NORS y diversos sistemas de apoyo a la operación desarrollados previamente. En 1995, la interfaz original del simulador NORS se sustituyó con la nueva interfaz persona-máquina unificada, denominada UMMI (*Unified Man-Machine Interface*), que integra en una unidad las interfaces del proceso NORS y de los COSS (Hol, Førdestrømmen, Meyer y Olsen, 1994). Así el sistema de alarma HALO se reemplazó con el sistema de alarma CASH (Førdestrømmen y Kvalem, 1996), que se empleó durante el experimento de automatización.

HAMMLAB ha sido objeto de numerosas actualizaciones y modificaciones de diseño (Fält et al., 1995; Jokstad et al., 2002; Saarni et al., 2001; Sebok, Grini, Larsen, Ness y Sørensen, 1999). En marzo de 2004 se inauguró, en otro edificio, un nuevo laboratorio de *Man-Technology-Organization* (MTO), que incluye, entre otros, el laboratorio HAMMLAB y el centro de realidad virtual. El alcance y los objetivos del laboratorio se han ampliado considerablemente desde la década de los ochenta, incluyendo en la actualidad incluso investigación experimental sobre la fiabilidad humana y los centros de control de la recarga.

El laboratorio HAMMLAB se puede clasificar en la categoría del Organismo Internacional de Energía Atómica de otro tipo de simuladores debido a la flexibilidad de la interfaz y a mantener la fidelidad funcional de la planta (Boring, 2011), simulador de sala de control reconfigurable de alcance total para investigación (Boring, 2011), simulador de alcance total (Miberg-Skjerve y Skraaning, 2004; Skjerve y Bye, 2011) y simulador parcial muy avanzado (Theureau, 1998, 2000), ya que algunos de los simuladores en HAMMLAB cubren la mayoría de los sistemas que se encuentran en el simulador de alcance total, pero la disposición física y los medios de control son diferentes –no es una réplica directa de una sala de control nuclear– (Drøivoldsmo, 2003). Lo que distingue a HAMMLAB de un simulador de alcance total es principalmente la filosofía y la capacidad para desarrollar y probar nuevos conceptos de presentación, diseños de salas de control avanzadas. La funcionalidad de los simuladores de HAMMLAB permite una operación similar a la realizada en la planta real y, para

algunas tareas, esta simulación es incluso más avanzada que la proporcionada por los simuladores específicos de entrenamiento de la planta de referencia (Drøivoldsmo, 2003).

En esta sección se describe, en primer lugar, la configuración general de la sala de control del simulador NORS en HAMMLAB, para a continuación detallar los displays de información de los puestos del operador de reactor y de turbina. Saarni et al. (2001) describen en detalle la sala de control de HAMMLAB del experimento de automatización.

9.5.2.1 Disposición general de la sala de control

Førdestrømmen y Kvalem (1996) explicitan que la disposición de la sala de control experimental en HAMMLAB se corresponde con las denominadas “cabinas” (*cockpit*), que implica que los operadores tienen disponible toda la información y controles esenciales desde su posición normal de trabajo, sentados en una silla con ruedas, con la que se pueden desplazar.

La disposición de la sala de control en el experimento de automatización se muestra en la figura 9-3, cuenta con tres puestos de trabajo: el operador de reactor en el lado izquierdo, el operador de turbina en el derecho y detrás el supervisor de sala. Existe un ángulo libre de visión para que el supervisor también pueda emplear la información de visión general. La sala de control consta de una estación (consola) de control para cada uno de los operadores y otra estación de control para el supervisor.



Figura 9-3. Disposición de HAMMLAB en el experimento de automatización.

El equipo de operación disponía de un display de visión general permanente mostrado en una pantalla de gran tamaño. Las estaciones del operador están equipadas con nueve monitores (sólo ocho pantallas están activas, como se observa en las Figuras 9-4 y 9-5): cuatro en la fila superior y cinco en la fila inferior. En la fila superior se encuentra la información del nivel de visión general (*overview*), no existiendo la posibilidad de interacción por parte de los operadores. En la fila inferior se muestra la información más detallada, las pantallas allí ubicadas constituyen el nivel operacional; se emplean para la vigilancia y el control del proceso (Førdestrømmen y Kvalem, 1996).

En la fila superior, los operadores disponían de displays de alarmas y de tendencias de parámetros clave del proceso, que eran fijos y diferentes para el operador de reactor y de turbina, así

como de un display de visión general de los sistemas de control automático que era idéntico para ambos operadores. A propósito de los displays de alarmas, uno de ellos presentaba la información importante o clave, simulando las ventanas anunciadoras de los sistemas convencionales, mientras que el segundo display constaba de una lista cronológica de mensajes de alarmas.

En la fila inferior, los operadores pueden seleccionar formatos del proceso, curvas de tendencias y un sistema de apoyo a la operación que proporciona información sobre la lógica existente en el sistema automático. El control del proceso se realiza a través de los displays NORS. El operador decide, a través de un menú, qué información desea tener disponible en las pantallas operacionales. De esta forma, el operador construye un conjunto de displays en función de sus necesidades.

La disposición de información para el puesto del operador de reactor y del operador de turbina se muestra, respectivamente, en las figuras 9-4 y 9-5 (adaptado de Hollnagel y Miberg, 1999).

	Automatiza ción	Curvas de tendencias	Alarmas en ventanillas	Alarmas en lista de primario
Formatos del proceso Curvas de tendencias	Formatos del proceso Curvas de tendencias		Formatos del proceso Curvas de tendencias	Formatos del proceso Curvas de tendencias ALDIV

Figura 9-4. Disposición de información en el puesto del operador de reactor.

Alarmas en lista de secundario	Alarmas en ventanillas	Curvas de tendencias	Automatiza ción	
Formatos del proceso Curvas de tendencias ALDIV	Formatos del proceso Curvas de tendencias		Formatos del proceso Curvas de tendencias	Formatos del proceso Curvas de tendencias

Figura 9-5. Disposición de información en el puesto del operador de turbina.

9.5.2.2 Display de visión general en pantalla de gran tamaño

La pantalla de gran tamaño es de la compañía Dr. Seufert de Alemania, consta de dos módulos, en donde el tamaño de cada display es de 1.00 x 0.75 m (tamaño total de 2.00 x 0.75 m). La calidad de la imagen es muy buena, ya que es estable, tiene buen contraste y la intensidad de la luz es aproximadamente igual en toda la superficie, lo que permite observar la pantalla sin distorsiones desde las diferentes posiciones del equipo de operación en la sala de control (Saarni et al., 2001).

El display de visión general permanente en pantalla de gran tamaño, en el centro de la figura 9-3, incluye información global del estado de la planta, se puede observar desde los tres puestos de operación, no existiendo interacción posible de los operadores con el display. Es un display de visión general basado en diagramas (representaciones) del proceso, estando organizado de acuerdo a los principales sistemas y funciones de planta, para presentar, en posición dedicada y fija, la información dinámica de un conjunto de parámetros clave del proceso, un conjunto de alarmas clave así como de alarmas agrupadas. Existe un amplio conjunto de símbolos e iconos que facilitan el reconocimiento de los componentes por parte de los operadores. El fondo de la pantalla es azul oscuro (Saarni et al., 2001). En la figura 9-6 se muestra la parte del primario y, en la figura 9-7, se incluye parte del primario y el secundario.

Cubre tres modos de planta: parada caliente, espera en caliente y arranque/operación a potencia en situación de operación normal, anomalías y emergencias (Saarni et al., 2001).

En la figura 9-6 la información está agrupada por sistemas, mostrando gran parte del primario y el sistema de monitorización de las funciones críticas de seguridad, denominado CFMS (*Critical Function Monitoring System*):

- Sistema de protección de la planta.
- Sistema volumétrico y sistema de boro. Comprende los sistemas para el tratamiento del agua del primario, para añadir y eliminar agua pura o *agua borada* (disolución de ácido bórico en agua) del primario, purificar el agua eliminada del primario, etc.
- Sistemas de emergencia para enfriar el primario, inyección de alta y baja presión de agua y sistema de rociado (*sprinkler*).
- Comprobación lógica de la actuación de los programas de boro y dilución.
- Sistema de monitorización de las funciones críticas de seguridad (CFMS).

En la figura 97 la información está agrupada por sistemas, comprendiendo una parte del primario y todo el secundario, destacando:

- Principales parámetros del reactor, controladores e información de las barras de control.
- Lazos del primario (bombas de recirculación), el presionador y los generadores de vapor.
- Información del sistema secundario: vapor, turbinas, condensador y sistemas de condensado y de agua de alimentación.
- Sistema eléctrico y diésel de emergencia.
- Estado de la planta (modo de operación).
- Balance de energía (diagrama de balance de potencia entre el primario-reactor y los circuitos del secundario).

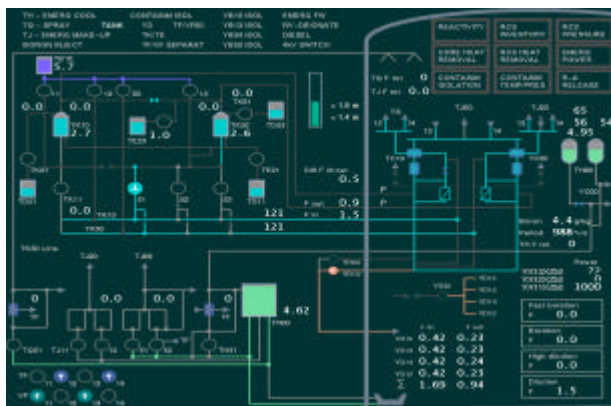


Figura 9-6. Display de visión general de gran tamaño del primario y CFMS.

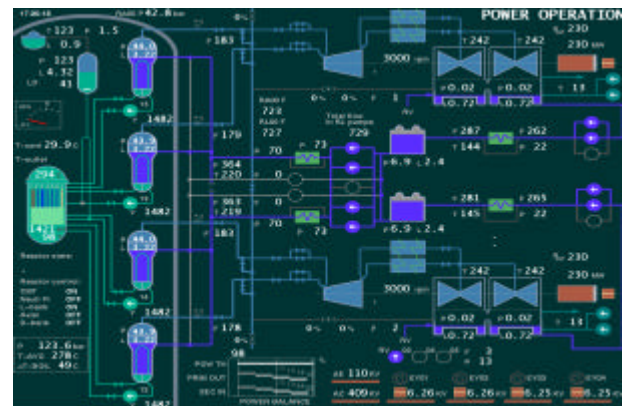


Figura 9-7. Display de visión general de gran tamaño del secundario (y parcial del primario).

La presentación de alarmas se basa en el principio de panel oscuro, que implica que no se muestran alarmas al operador cuando el proceso está operando en condiciones normales. La aparición de una alarma indica una condición de operación anómala. Cuando se activa la alarma, adopta el color asociado con su prioridad (magenta, rojo o amarillo) (Saarni et al., 2001).

Las líneas indican, por código de colores, si existe caudal. El gris indica que no hay caudal, mientras que la existencia de caudal conlleva diversos colores dependiendo de los sistemas de planta. Por ejemplo, los sistemas auxiliares del reactor (*normal make up system and drain collection* o TK, *coolant purification system* o TC y *pre-purification of coolant drainage* o TE) en azul turquesa, los sistemas de condensado y agua de alimentación (*main condensate transfer* o RM, *feedwater transfer* o RL, *low pressure turbine steam extraction and low pressure preheaters* o RH) en azul intenso y los sistemas de emergencia (*spray system* o TQ, *emergency core cooling system* o TH, *emergency make up system* o TJ) en verde claro (Saarni et al., 2001).

El display de visión general de gran tamaño se puede emplear tanto individualmente, durante la realización de las tareas de cada operador, como conjuntamente, cuando los miembros del equipo intercambian información, sobre todo en las tareas de solución de problemas, por lo que facilitará el trabajo en grupo y mejorará la actuación del equipo (Saarni et al., 2001).

9.5.2.3 Sistema de alarma CASH

El sistema de alarma CASH fue diseñado para sustituir al sistema de alarma HALO en el simulador NORS en HAMMLAB, con los objetivos principales de aumentar la estructuración de las alarmas, mejorar la presentación de información en la interfaz y disponer de un *software* altamente sostenible (Miazza, Torralba, Kårstad, Moum y Follesø, 1993).

El desarrollo del sistema de alarma CASH se inició en 1992, siendo diseñado entre 1992 y 1994, implantado en el laboratorio y empleado por primera vez en un experimento en HAMMLAB en 1995 (Moum et al., 1998).

Del sistema CASH, destacar la descripción de las bases de diseño y de las funciones principales (Miazza et al., 1993), las características de diseño (Førdestrømmen, Moum y Torralba, 1994), la implantación del sistema en HAMMLAB (Moum et al., 1996), las lecciones aprendidas de los operadores y las experiencias de los diseñadores (Moum et al., 1998) y la descripción de la interfaz del simulador NORS de HAMMLAB en el año 2000 (Saarni et al., 2001).

Los principios de factores humanos para mejorar el diseño de las pantallas y la interacción persona-sistema, recogidos en la tabla 4-2, fueron incorporados en el diseño de la interfaz del sistema CASH, en aspectos como el contenido del mensaje de alarma o las abreviaturas (Førdestrømmen et al., 1994). Desde las primeras etapas de desarrollo del sistema, el objetivo era satisfacer el principio de diseño de panel oscuro (Førdestrømmen y Torralba, 1993). Ha sido desarrollado como un sistema flexible y configurable, se diseñaron e implantaron una variedad de formas de presentación (Moum et al., 1996, 1998), a continuación sólo se describe la configuración de CASH del experimento de automatización (Moum et al., 1996).

La distribución del sistema de alarma en dos niveles fue preferida por cuatro de los seis equipos de operación de la planta Loviisa, que participaron en un experimento de sistemas de alarma en HAMMLAB (Moum et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000), siendo también la configuración preferida por los diseñadores del sistema CASH (Moum et al., 1998).

9.5.2.3.1 *Display del sistema de alarma en ventanillas*

Los displays de CASH encajarían en la clasificación de la U.S. NRC de espacialmente dedicados y continuamente visibles (NUREG-0700, 2002). El diseño de estos displays simula la disposición de alarmas en las ventanillas de la parte superior de los paneles de las salas de control convencionales e híbridas (Moum et al., 1996). Las alarmas importantes o clave se muestran en forma de ventanilla, existiendo una pantalla para las alarmas del primario (figura 98) y del secundario (figura 99), estando diseñadas para usarlas en combinación con las listas de alarma (Moum et al., 1996).

Consta de un total de 194 ventanillas (Moum et al., 1996), se muestran aproximadamente 250 alarmas clave en cada pantalla (Saarni et al., 2001), en concreto 237 alarmas del lado primario y 268

alarmas en el lado secundario, por lo que cada ventanilla representa una o varias alarmas (Moum et al., 1996; Moum et al., 1998). Las alarmas están agrupadas por sistemas y subsistemas, demarcadas por líneas blancas, mostrando la denominación de los sistemas en una cartulina ubicada en la parte exterior de las pantallas (Moum et al., 1998). La prioridad de la alarma se indica por código de color: roja para máxima prioridad y amarilla para segunda prioridad (Moum et al., 1998).

Las alarmas seleccionadas corresponden a un nivel alto de supresión de alarmas, con el objeto de mostrar en los displays de ventanilla solamente las alarmas más representativas e importantes.

La importancia de los displays espacialmente dedicados y continuamente visibles de CASH es que la información clave de alarmas, o las alarmas más relevantes, están siempre visibles (Førdestrømmen y Torralba, 1993; Moum et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000). La limitación de no permitir determinar el momento de activación de la alarma, ni la secuencia de ocurrencia de las alarmas, se compensa con la información mostrada en la lista de alarmas (Saarni et al., 2001).

En la figura 9-8 se muestran las alarmas clave del primario, agrupadas por sistemas. Y en la figura 9-9 se presentan las alarmas clave del secundario, también agrupadas por sistemas.

Figura 9-8. Alarmas del primario en ventanillas.

Figura 9-9. Alarmas del secundario en ventanillas.

9.5.2.3.2 Display del sistema de alarma en lista de alarma

Los principios base de diseño tenidos en consideración para las listas del sistema de alarma CASH están descritos en Torralba (1993a, 1993b, 1994a y 1994b) y Førdestrømmen et al. (1994). En el diseño de las listas del sistema CASH se tuvieron en consideración los principios básicos de capacidades y limitaciones humanas (Førdestrømmen et al., 1994).

Las alarmas se muestran en dos listas cronológicas de alarmas, una lista para el primario (figura 9-10) y otra lista para el secundario (figura 9-11). En la sala de control de la central de referencia Loviisa hay dos listas de alarmas, una lista de alarmas de primera prioridad y una lista de alarmas de segunda prioridad, por lo que los operadores están acostumbrados a emplear las listas de alarmas en la planta. Los operadores indicaron que preferían que las alarmas estuvieran distribuidas en función del puesto del operador, siendo, por consiguiente, una distribución diferente de la información disponible en la planta (Moum et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000).

Las listas están etiquetadas en la parte superior (*primary side* o *secondary side*), indican el número de alarmas existentes en cada lista, incluyen las opciones de prueba, comprimir y reconocer así como la hora. Las listas están organizadas por orden cronológico, con el mensaje de alarmas más reciente en la parte inferior de la lista, mostrando un mensaje de alarma en cada línea, divididas en secciones por una línea de separación que indica la longitud de la lista con el objeto de facilitar la búsqueda horizontal (Førdestrømmen et al., 1994; Moum et al., 1996, 1998; Saarni et al., 2001; Torralba, 1994b). En el lado derecho de la línea divisoria se indica la sección a que pertenecen del total de secciones de alarmas existentes y, puesto que hay un espacio máximo de 25 mensajes de alarmas simultáneos en pantalla, la lista de alarmas está dividida en secciones de cinco mensajes cada una (Moum et al., 1996, 1998; Saarni et al., 2001). Si la lista de alarmas está llena, el sistema proporciona un desplazamiento automático de la lista de alarmas para que el operador pueda ver las alarmas más recientes (Moum et al., 1998; Saarni et al., 2001; Sebok et al., 1999).

El mensaje de alarmas está organizado de lo general a lo específico. Cada mensaje contiene, de izquierda a derecha, la siguiente información (Førdestrømmen et al., 1994; Moum et al., 1996, 1998; Saarni et al., 2001; Torralba, 1994a, 1994b):

- Símbolo visual anunciador de nuevas alarmas: un asterisco. El asterisco intermitente en la parte izquierda de la lista indica que la alarma no está reconocida.
- Tiempo de ocurrencia de la alarma: momento de activación de la alarma.
- Código identificador de la alarma o TAG⁵⁹. La notación se corresponde con las dos primeras letras del código para definir el sistema, los dos números siguientes indican el subsistema, la siguiente letra se refiere al componente (como bomba, válvula, tanque, filtro o intercambiador de calor) o al tipo de señal (nivel, presión, temperatura, etc.), para componentes y señales analógicas los tres números siguientes se refieren al componente o señal, mientras que para señales binarias se incluye una letra y dos números que especifican la señal (Leikkonen, 1983).
- Texto de la alarma, indicando la descripción textual del sistema/componente en alarma, un identificador del sistema/componente, una explicación del parámetro/componente en alarma (temperatura, nivel, abierto o cerrado) y la severidad de la alarma (alta o baja).
- Valor actual: valor cuantitativo del parámetro en alarma en el momento presente.
- Límite del parámetro en alarma (o punto de tarado): límite cuantitativo que ha sido excedido y que origina que el parámetro entre en alarma.
- Unidades de medida, tales como metros o bares.
- La prioridad de la alarma está indicada mediante un código de color.

Se puede ver en qué momento la alarma ha sido activada y desactivada, a través del campo tiempo (Saarni et al., 2001). Resulta fácil comparar el límite de la alarma con el valor actual, lo que ayuda al operador a decidir qué hacer si el valor disminuye o aumenta (Førdestrømmen et al., 1994; Saarni et al., 2001; Torralba, 1994b).

⁵⁹ En la etapa de diseño de las principales características del sistema de alarma CASH se había incluido el código identificador del formato del proceso NORS que exhibe la alarma, de forma que pudiera facilitar al operador el acceso a los formatos del proceso (Førdestrømmen et al., 1994; Torralba, 1994a, 1994b). Sin embargo, en la implementación del sistema CASH para el experimento de automatización se decidió incluir en su lugar el código identificador de la alarma (TAG) (Moum et al., 1996), puesto que operadores que habían participado con anterioridad en experimentos en HAMMLAB indicaron que no se emplea el código del formato del proceso NORS (al menos en el caso de operadores con experiencia) (Moum et al., 1998).

Los mensajes de alarma están organizados en seis columnas, para facilitar la búsqueda vertical y seleccionar fácilmente la parte de interés del mensaje de alarma (Førdestrømmen et al., 1994; Saarni et al., 2001; Torralba, 1994b). Las diferentes partes del mensaje de alarma están diseñadas como unidades conceptuales independientes o dependientes, de modo que el operador las use de modo separado o combinado, en función de sus necesidades específicas (Førdestrømmen et al., 1994; Torralba, 1994b). A continuación se muestra en la tabla 9-11 un ejemplo de un mensaje de alarma.

Tabla 9-11. *Disposición del Contenido del Mensaje de Alarma en la Lista de Alarmas*

Contenido del mensaje de alarma por columnas					
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6
*	Hora de ocurrencia	Código del parámetro	Texto de la alarma + severidad	Valor real y límite	Unidad de medida
*	09:10:03	RL50L001P52	FEEDWATER TANK RL50: L LO	2.1 < 2.2	M

La identificación de la alarma o mensaje del texto (columna 4 de la tabla 9-11) consta de cinco partes diferentes para facilitar la búsqueda de los operadores en la misma. La distribución del texto de la alarma es la siguiente (Førdestrømmen et al., 1994; Torralba, 1994a, 1994b):

- Descripción textual del sistema/componente en alarma: el sistema o componente que entra en condición anómala.
- Identificador del sistema/componente en alarma: denominación del componente en alarma en el simulador NORS, que en unos casos proporciona la misma información que la descripción textual mientras que en otros da información más específica, como puede ser el tren en que se encuentra.
- Colon: para facilitar la lectura del mensaje.
- Componente/parámetro en alarma: temperatura, nivel, abierto o cerrado, etc.
- Severidad: el valor de severidad asociado al parámetro en alarma.

En la tabla 9-12 (Førdestrømmen et al., 1994; Torralba, 1994a, 1994b) se muestran ejemplos de las distintas partes de las que consta el mensaje, tanto para parámetros (alarmas analógicas) como para componentes (alarmas binarias).

Tabla 9-12. *Identificación de la Alarma para Parámetros y Componentes (Førdestrømmen et al., 1994; Torralba, 1994a, 1994b)*

Descripción textual del sistema/componente en alarma	Identificador del sistema/componente	Colon (:)	Parámetro o componente	Severidad
FEEDWATER PUMP BEARING	RL21	:	TEMP	HI
FEEDWATER TANK	RL50	:	LEV	LO
MAIN TRANSFORMER	AT01	:	NET OFF	
STEAM RELIEF VALVE	RA13	:	OPEN	

En la figura 9-10 se muestra un ejemplo de una lista de alarmas del primario, mientras que en la figura 9-11 se presenta un ejemplo de una lista de alarmas del secundario.

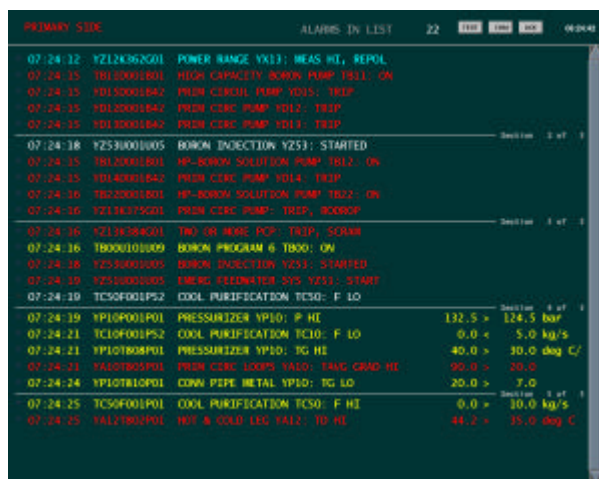


Figura 9-10. Lista de alarmas del primario.

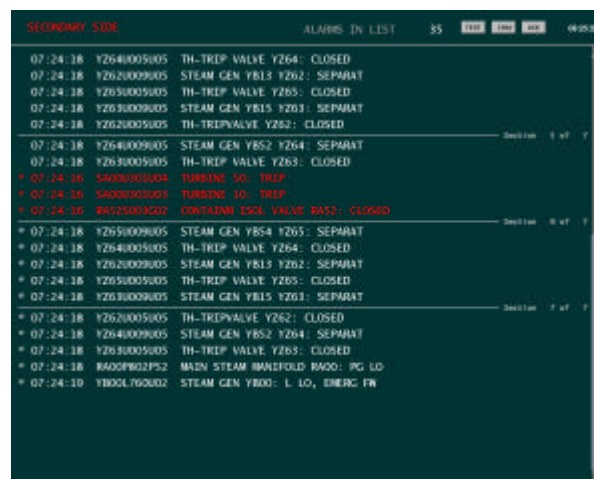


Figura 9-11. Lista de alarmas del secundario.

9.5.2.3.3 Acciones de reconocer, silenciar y comprimir la alarma en el sistema CASH

Los controles empleados para las acciones de silenciar, comprimir y reconocer las alarmas estaban ubicados en seis teclas del teclado, existiendo las opciones de alarmas del primario, alarmas del secundario y todas las alarmas (del primario y del secundario, independientemente del puesto que ocupe el operador), se muestra en la figura 9-12 (cintas de vídeo del experimento; Moum et al., 1998).

Primary Alarms / Secondary Alarms

F9	F10	F11	F12
	SIL	COM	ACK

All Alarms

Print	Scroll	Pause
SIL	COM	ACK

Figura 9-12. Botones del teclado: silenciar, comprimir y reconocer las alarmas.

Se describe a continuación, conforme a Moum et al. (1998), el procedimiento de anunciación y reconocimiento de las alarmas. La anunciación visual de cada nueva alarma viene acompañada por anunciación auditiva. En la alarma en ventanilla, el marco existente alrededor pasa a destellar en el color de la alarma de mayor prioridad. En la lista de alarma, el mensaje de alarma se muestra con el asterisco intermitente en la parte izquierda de la lista.

Cuando el operador reconoce la alarma, el marco de la ventanilla parará la intermitencia, permaneciendo en el mismo color de la alarma de máxima prioridad. El texto, icono o símbolo representando la alarma activa dentro de una ventanilla adopta el color de la alarma, mientras que las alarmas no activas dentro de la misma ventanilla permanecen oscurecidas (para satisfacer el concepto de panel oscuro: no llamar la atención de los operadores). Al reconocer la alarma, el asterisco intermitente –símbolo indicador de que la alarma no está reconocida– desaparece de la pantalla.

Las alarmas desactivadas cambian a color blanco hasta que el operador las comprime. La acción de comprimir se emplea para eliminar de la pantalla las alarmas desactivadas.

El botón silenciar sirve para detener la anunciación auditiva de nuevas alarmas.

9.5.2.3.4 *Procesamiento de alarmas en el sistema CASH*

El procesamiento de alarmas permite reducir el número de alarmas que sucede durante anomalías en la planta, mediante reglas o algoritmos que determinan la importancia operacional de las condiciones de alarma. En el procesamiento de alarmas del sistema CASH se emplea la supresión de alarmas, pero no el filtrado de alarmas, es decir, las alarmas suprimidas se muestran en los displays del proceso NORS, estando visibles a los operadores.

La reducción de alarmas en CASH se logra por varios métodos: el procesamiento de alarmas molestas (*nuisance alarm processing*), que consiste en eliminar las alarmas que son irrelevantes para el modo actual de la planta, el procesamiento de alarmas redundantes (*redundant alarm processing*), que determina qué alarmas, aunque válidas, son menos importantes, al proporcionar información que resulta redundante con otras alarmas que han sido anunciadas (Moum et al., 1998).

En el experimento de automatización se empleó el máximo nivel de procesamiento de alarmas molestas y de alarmas redundantes (Moum et al., 1998):

- Las técnicas de procesamiento de alarmas para eliminar las alarmas molestas son: 1) separación de estado y alarma: alarmas que indican que un ítem está en un determinado estado; 2) relación de modo: alarmas que son irrelevantes en el modo operacional actual, incluyendo el procesamiento basado en el estado del sistema de planta; 3) dependencia de tiempo: retrasa la actuación de una alarma durante un período de tiempo predefinido, para asegurar que la condición en alarma es estable y evitar su accionamiento como respuesta a fluctuaciones momentáneas.
- Las técnicas de procesamiento de alarmas que se emplean para eliminar las alarmas redundantes son: 1) relaciones multipunto de tarado: emplea las relaciones entre puntos de tarados múltiples de una variable del proceso para determinar el tratamiento de alarma; 2) relaciones causales: identificación de alarmas en base a relaciones causa-efecto con otras condiciones que están en alarma.

9.5.2.4 **Display de curvas de tendencias**

El display de curvas de tendencias presenta seis parámetros principales de la planta en dos pantallas, una para el primario (figura 9-13) y otra para el secundario (figura 9-14). La dinámica de los parámetros principales del proceso se actualiza constantemente durante el transcurso del escenario.

Los parámetros empleados en los diagramas de tendencias del primario y del secundario coinciden con los empleados en la planta de referencia C. N. Lovissa (Saarni et al., 2001). Los parámetros de los diagramas de tendencias del primario son los siguientes: presión de vapor del colector principal, potencia del reactor, diferencia del valor normal en el nivel del presionador, presión del reactor, potencia de la turbina I y potencia de la turbina II (Hollangel y Miberg, 1999).

Los parámetros de los diagramas de tendencias del secundario son: presión de vapor del colector principal, caudal total del agua de alimentación, caudal total del vapor, caudal de agua adicional dentro del circuito secundario, nivel del tanque de agua de alimentación I y nivel del tanque de agua de alimentación II (Hollangel y Miberg, 1999).

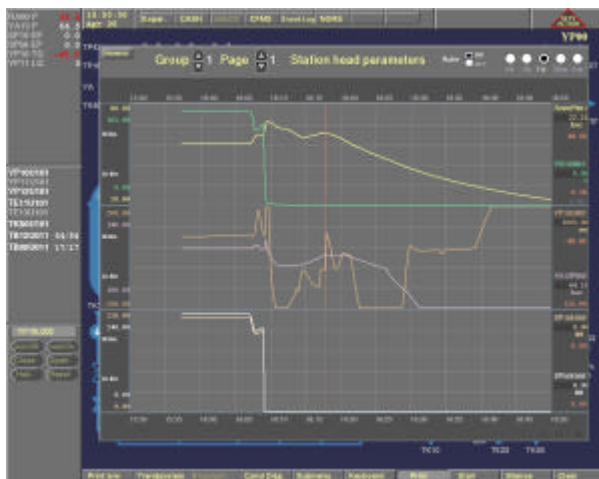


Figura 9-13. Tendencias del primario.

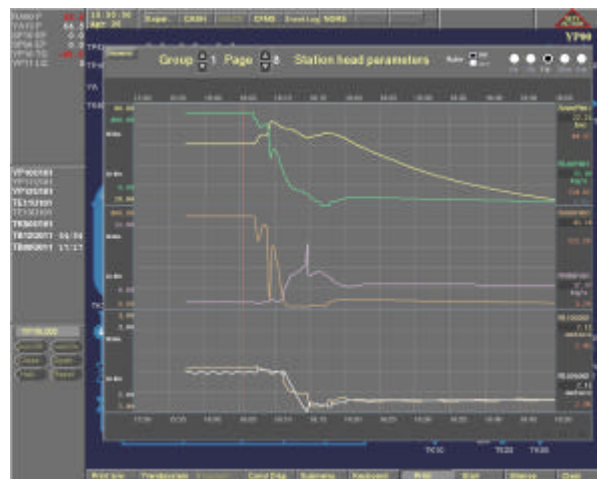


Figura 9-14. Tendencias del secundario.

En ambos casos, el número de curvas se ha limitado a seis para facilitar los procesos de observar, distinguir y comparar las tendencias (Saarni et al., 2001).

9.5.2.5 Display de visión general de los sistemas del control automático

El display muestra una visión general de los sistemas más importantes del control automático, comprende información del primario y del secundario (ver figura 9-15). Están incorporados los sistemas de planta, controles del reactor y de las turbinas, controladores del nivel y de la presión del presionador, niveles de los generadores de vapor y las válvulas de baipás del vapor (Saarni et al., 2001).

El display se empleó por primera vez en el experimento de automatización, por lo que los operadores proporcionaron comentarios sobre su utilidad y aspectos a mejorar. Indicaron que requiere una amplia formación sobre su contenido para poder usarlo, muestra una alta densidad de información. Entre las posibles mejoras están la inclusión de cajas funcionales que proporcionen la opción de navegar para obtener información más detallada, o la inclusión de dinamismos en las líneas que unen los diferentes controladores para proporcionar una visión global. No obstante, Saarni et al. (2001) consideran que resulta necesario, dado el elevado nivel de automatización del simulador NORS.

9.5.2.6 Display ALDIV

El display intérprete y visualizador de los diagramas lógicos automáticos ALDIV (*Automatics Logic Diagram Interpreter and Visualiser*) muestra diagramas lógicos de los sistemas de control automático del simulador NORS, existiendo aproximadamente 2000 diagramas lógicos (Saarni et al., 2001).

Es un sistema que presenta relaciones lógicas entre señales de control del simulador. Muestra identificadores lógicos que incluyen descriptores textuales, valores de alarmas, puertas lógicas y elementos lógicos. El operador selecciona el sistema ALDIV mediante un componente de cualquier formato del proceso NORS (como puede ser una válvula, una bomba, un calentador o un controlador) y, posteriormente, hay que pulsar el botón *Lógica* (*Logic*) de la parte inferior de la pantalla (Saarni et al., 2001).

La figura 9-16 muestra un ejemplo de un display lógico para el control de un subgrupo de NORS. Se puede consultar Ditlefsen, Kristiansen, Meyer y Haukenes (1997) y Saarni et al. (2001) para información adicional sobre el sistema ALDIV.

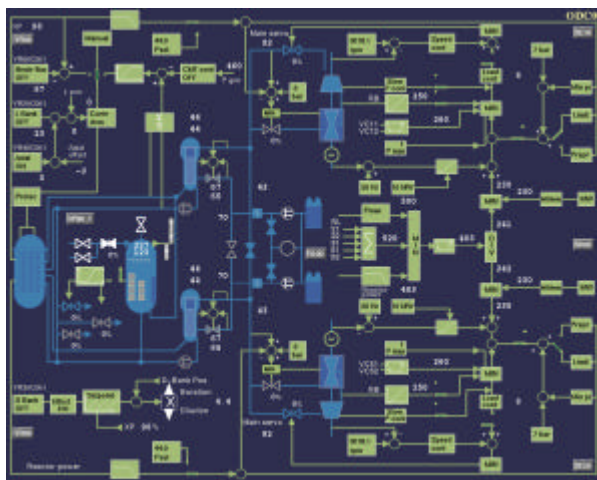


Figura 9-15. Visión general de automatización.

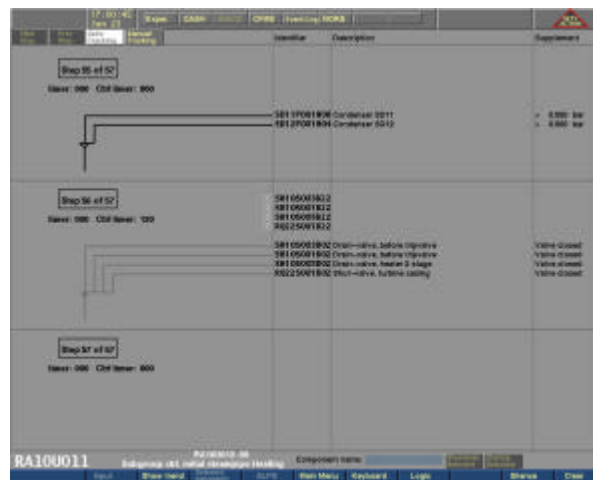


Figura 9-16. Formato de ALDIV.

9.5.2.7 Display de curvas de tendencias

Las pantallas de curvas de tendencias muestran los valores históricos de un conjunto seleccionado de variables en un período temporal. El sistema de diagramas de tendencias está integrado en los formatos de la interfaz unificada de NORS, se selecciona a través del botón sistema de tendencia (*trendsystem*), ubicado en la parte inferior de la pantalla (Førdestrømmen y Kvaalem, 1996; Saarni et al., 2001). En la figura 9-17 se muestra el menú de selección de las curvas de tendencias.

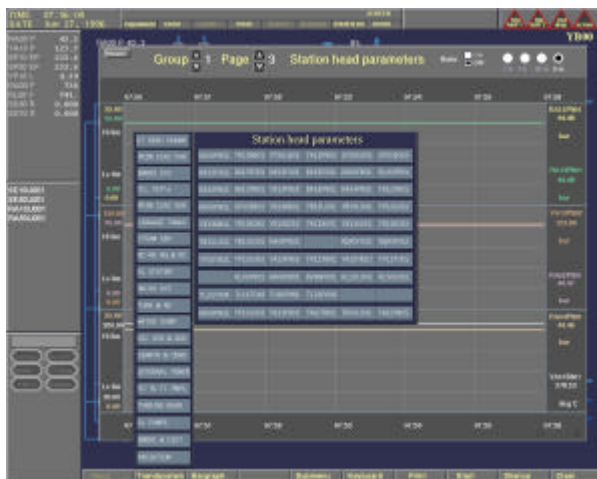


Figura 9-17. Menú de selección de curvas de tendencias.

Están definidas tendencias para 1200 variables, existiendo, por tanto, aproximadamente 200 displays de tendencias, ya que se muestran seis parámetros en cada display. El operador también puede obtener una única curva de tendencias para los 1200 parámetros definidos, seleccionando directamente en los displays del proceso NORS y utilizando después el valor de tendencia (Førdestrømmen y Kvaalem, 1996; Saarni et al., 2001).

9.5.2.8 Display de formatos del proceso NORS

En el simulador NORS existen 45 displays del proceso y de control, que contienen la funcionalidad necesaria para realizar la monitorización detallada y el control del proceso de los

sistemas incluidos en cada display, también están integradas las alarmas (Saarni et al., 2001). S. Baker y Marshall (1983) describen los principios del programa de formación para el simulador NORS, mientras que la formación inicial para los operadores empleando el simulador NORS en los experimentos está incluida en S. Baker y Marshall (1985).

En la figura 9-18 se muestra el formato YP00, que es frecuentemente empleado por el operador de reactor, al proporcionar una visión general del primario, comprende información relevante sobre el estado del reactor, el presionador, el sistema de aporte y purga, el sistema de boro y los lazos del primario del reactor a los generadores de vapor.

En la figura 9-19 se incluye el formato RL00, ampliamente usado por el operador de turbina, al proporcionar una visión general del estado del agua de alimentación.

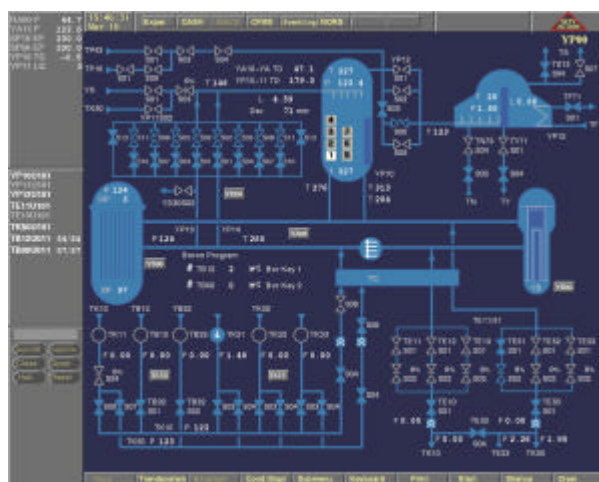


Figura 9-18. Formato YP00 del primario.

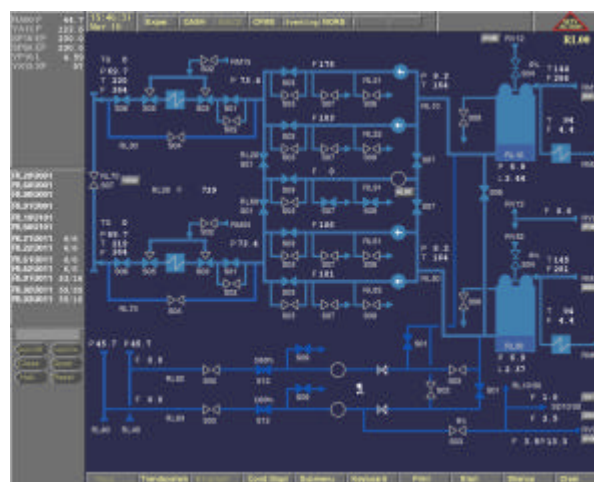


Figura 9-19. Formato RL00 del secundario.

La disposición de la información del proceso NORS es idéntica para todas las pantallas disponibles en la fila de bajo nivel, se muestra en la figura 9-20. Se denomina interfaz unificada, es una disposición genérica de display, que se divide en una serie de campos, con funciones bien definidas (Førdestrømmen y Kvalem, 1996; Hol et al., 1994; Saarni et al., 2001).

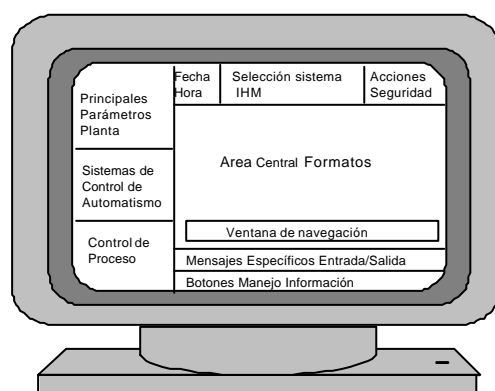


Figura 9-20. Disposición general del display NORS.

Las bases y las motivaciones del diseño de la interfaz integrada de NORS están explicadas en Hol et al. (1994). De acuerdo a Hol et al. (1994) y Saarni et al. (2001), se muestra la siguiente información (figura 9-20), de derecha a izquierda, de arriba a abajo:

- Acciones de seguridad, comprende cuatro botones, para el disparo de las dos turbinas, el disparo del reactor y la inserción de las barras de control.
- Acceso a los diferentes sistemas que están integrados en la interfaz unificada de NORS (sistema CFMS, registro de sucesos, etc.) desde el campo superior de selección de sistema.
- Fecha y hora.
- Área del estado de los principales parámetros de la planta que muestra los principales parámetros del proceso, con el objeto de que mientras que los operadores están trabajando en las pantallas de NORS, no necesiten mirar, frecuentemente, a los displays de visión general.
- Área de sistemas de control de automatismos, que incluye los automatismos relacionados con los formatos de NORS que se están mostrando.
- Campo de control del proceso para actuar sobre los componentes, por ejemplo, abrir y cerrar válvulas, arrancar y parar bombas.
- En la interfaz unificada está integrado un teclado de navegación en NORS (ver figura 9-21) para seleccionar los formatos del proceso, existiendo también un teclado alfanumérico en la consola del operador. El teclado está distribuido de forma similar a la disposición del proceso.
- Campo de mensajes de entrada y de salida presenta información adicional sobre el componente y permite introducir nuevos valores en los parámetros, se muestra un ejemplo en la figura 9-22.
- En la parte inferior existe unos botones de manejo de la información que permiten, por ejemplo, seleccionar tendencias o el teclado, imprimir la pantalla o silenciar las alarmas.

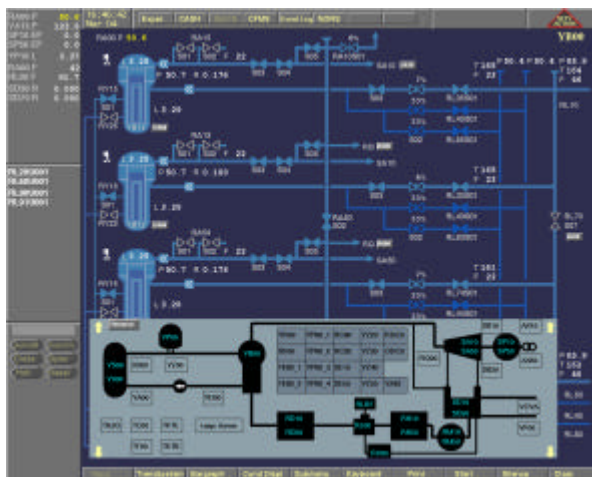


Figura 9-21. Formato del teclado en las pantallas de NORS.

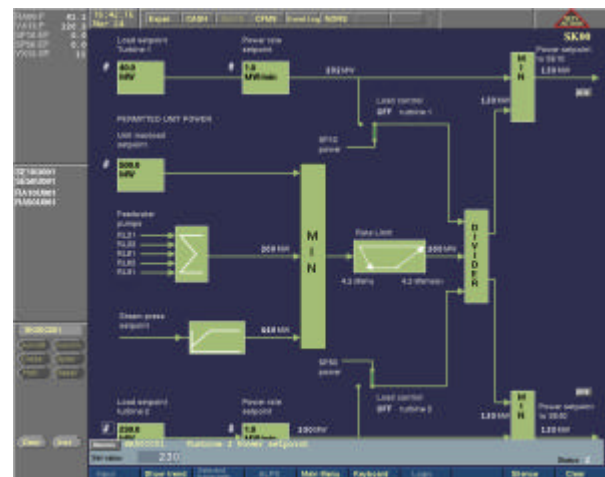


Figura 9-22. Formato del campo entrada y salida de datos en NORS.

Hay cinco displays del sistema de protección de la planta, que presentan dinámicamente la lógica, las acciones correctas a realizar por el sistema de protección y la realimentación resultante del proceso. Si por algún motivo el sistema de protección no ejecutara las acciones del modo esperado, el operador observaría fácilmente el problema y podría realizar las acciones en modo manual. Se muestra un formato de displays de protección de la planta en la figura 9-23.

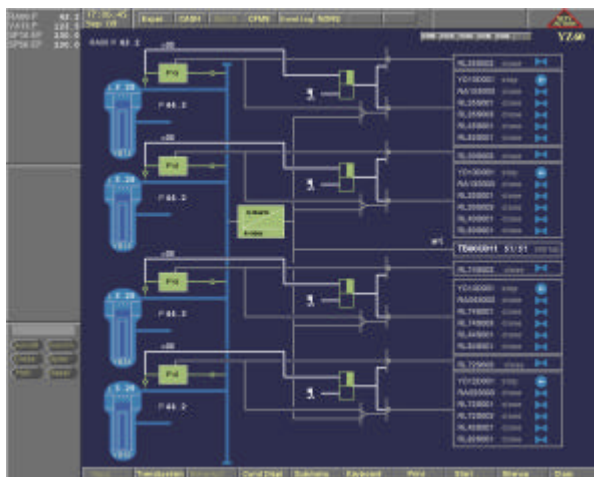


Figura 9-23. Formato YZ60 del sistema de protección de planta.

9.5.3 Evaluación de la interfaz de NORS en HAMMLAB

La interfaz de NORS en HAMMLAB ha sido objeto de evaluaciones de factores humanos para verificar sus principales características, tanto a nivel estático (guías de diseño) como dinámico, exponiéndose en este apartado los principales resultados.

9.5.3.1 Evaluación de factores humanos de la interfaz de NORS en HAMMLAB

La evaluación de la interfaz de NORS se ha realizado empleando una variedad de técnicas: entrevistas con personal de HAMMLAB (tres operadores del reactor *Halden Boiling Water Reactor* (HBWR), cuatro expertos en proceso y un líder experimental) para obtener comentarios de los usuarios sobre la interfaz, revisión de datos de experimentos grabados en vídeo observando la interacción de los operadores con la interfaz, así como una evaluación estática consistente en la aplicación de guías y directrices de factores humanos y revisiones basadas en la experiencia (Sebok et al., 1999).

La interfaz de NORS en HAMMLAB ofrece muchas características útiles (Sebok et al., 1999):

- Proporciona acceso a gran cantidad de información para monitorizar y controlar el proceso.
- Apoya el trabajo en equipo, el display de visión general de gran tamaño proporciona un punto común de referencia para la comunicación del equipo.
- La disposición de las pantallas es consistente en el display de visión general y en los formatos del proceso, por lo que ayuda a los operadores a aprender y a recordar el proceso.
- Consta de varios componentes de *software* diseñados individualmente e integrados a los que el usuario puede acceder.
- La información está codificada en colores y símbolos que facilitan la interpretación.
- La localización consistente de la información en los displays, en cuanto a áreas funcionales, apoya a los operadores en el aprendizaje y en el empleo del display.
- Los nuevos operadores han aprendido, en un tiempo relativamente corto, a controlar el proceso por medio de la interfaz.

No obstante, Sebok et al. (1999) indican que existen áreas que pueden mejorarse, como son los requisitos de datos de entrada, las opciones de control, la realimentación y la navegación en los

displays. También detectaron inconsistencias menores entre los formatos del proceso NORS, el display de visión general y el sistema de alarma. Las tendencias, los diagramas lógicos, las alarmas y el display de visión general proporcionan la información necesaria, identificando, también, aspectos a mejorar en cuanto a la facilidad de uso. Una explicación detallada de las deficiencias de factores humanos detectadas en la interfaz del simulador NORS está descrita en Sebok et al. (1999).

9.5.3.2 Experiencias de usuarios en la sala de control del experimento de automatización

En la tabla 9-13 se muestran los principales resultados de cuestionarios y entrevistas sobre la sala de control experimental HAMMLAB con operadores de C. N. Loviisa, aplicados durante el experimento de automatización (Saarni et al., 2001). Saarni et al. (2001), basándose en los resultados expuestos en la tabla 9-13, concluyeron que la interfaz de la sala de control NORS en HAMMLAB constituye una sala de control realista, compacta y eficiente, representa una sala de control avanzada de una central nuclear.

Tabla 9-13. *Opiniones de los Operadores sobre la Interfaz de la Sala de Control HAMMLAB (Saarni et al., 2001)*

Tópico	Opinión y comentario
Sala de control	
Sala de control compacta	Bien ⁶⁰ . Mejor comunicación visual y oral en salas de control pequeñas que grandes
Display de visión general de gran tamaño	Bien. Referencia común para el equipo. Facilita el trabajo en equipo. Mejora el trabajo en equipo
Número de pantallas	Bien. Cuatro pantallas es un número adecuado. Durante el experimento se observó que algunos operadores emplearon el display de visión general exhaustivamente y sólo una pantalla para operar
Recuperación de la información	Bien. Fácil
Operaciones de planta	Bien. Fácil
Navegación en el display	Bien. Fácil
Todos los displays disponibles en una pantalla	Bien
Dos o más pantallas por teclado/ratón	Dos está bien
Ventanas de navegación frente a panel táctil en la mesa	La ventana de navegación es buena
Display de visión general de gran tamaño	
Diseño fácil de entender	Sí. Bien
Representaciones del proceso, parámetros, símbolos, código de color, fuentes	Bien
Utilidad en operación normal y en anomalías	Sí. Bien
Formatos del proceso y de control	
Navegación en la ventana y en los botones de acceso directo	Bien
Campo fijo para el control del proceso frente a ventana emergente en el componente o teclado	Preferencia por los campos fijos. Bien
Estado de los botones de control del proceso	Bien
Campo de estado de parámetros	Bien
Campo de estado de los automatismos	Bien
Campo de acciones de seguridad	Bien
Operación de las barras de control	Bien
Campo del mensaje de entrada y salida	Bien
Botones de manejo de la información	Bien
Representación del proceso (líneas, símbolos, código de color, indicación de la alarma)	Bien
Formatos de control	Deberían tener líneas dinámicas

⁶⁰ El término bien significa que entre el 75% y el 100% de los operadores opinaban que una determinada característica o solución de diseño era buena.

Tópico	Opinión y comentario
Displays de tendencias	Bien
Displays lógicos para los sistema de control	Bien
Visión general de los sistemas de control automático	Importante tener líneas dinámicas. Resulta difícil entender el display. Se requiere mucha formación para emplear el display

9.5.4 Equipos de recogida y análisis de datos experimentales

La galería de los experimentadores y el equipo de recogida de datos, así como las herramientas de análisis empleadas en el experimento de automatización se describen a continuación.

9.5.4.1 Galería de los experimentadores

En la galería de los experimentadores existen ordenadores para controlar el experimento y para recoger datos, contando con sistemas de audio y vídeo, siendo posible monitorizar las grabaciones de vídeo a tiempo real. Las consolas de los sistemas del instructor están ubicadas en la galería.

La galería de experimentadores está separada de la sala de control HAMMLAB por una pared de cristal semitransparente (figura 9-24). En la galería de experimentadores participaron: 1) un líder experimental, que es el coordinador responsable de la recogida de datos y la persona de contacto con los operadores; 2) un experto en proceso, que proporciona explicaciones y comentarios durante los escenarios, actúa como personal de planta, evaluando a tiempo real la actuación del equipo.; 3) un especialista en el control de sistemas, que es responsable del funcionamiento del modelo del proceso (del simulador) y de la interfaz así como de la implementación de anomalías; 4) un técnico de laboratorio, que se encarga de las grabaciones del vídeo, del audio, del sonido y de la distribución de test y cuestionarios; 5) dos técnicos encargados de los aparatos de seguimiento de movimientos oculares (calibración y grabación de datos), uno para el operador de reactor y otro para el operador de turbina (Jokstad et al., 2002; Miberg, 1998a).

Desde la galería de experimentadores pueden ajustar las condiciones de iluminación de la sala de control, lo que resulta muy relevante cuando se emplean los aparatos de seguimiento de movimientos oculares con el objeto de evitar que se produzcan reflejos del techo en la pupila de los operadores (Jokstad et al., 2002).



Figura 9-24. Galería de experimentadores.

En HAMMLAB no hay instructores, puesto que la instalación no se emplea para la formación de operadores. Sin embargo, los expertos en proceso en la galería de los experimentadores emplean un sistema tradicional de instructor (el sistema original del simulador NORS) para introducir las anomalías en los escenarios (Jokstad et al., 2002).

9.5.4.2 Grabaciones de audio y vídeo

Las sesiones de tomas de datos quedan grabadas en cintas de vídeo y de audio. El equipo experimental se resume a continuación (Miberg, 1998a):

- Un canal de vídeo y un canal de audio, que aseguran la compatibilidad de señales y conectores, así como no interferir en la calidad de la señal (Førdestrømmen y Kvalem, 1996).
- Cuatro grabadores de vídeo, siendo dos grabadoras de vídeo altamente sofisticadas.
- Una unidad QUAD, que recibe hasta cuatro señales de vídeo, descompone la imagen digitalmente y proporciona una monitorización simultánea de cuatro localizaciones distintas en el mismo monitor (Førdestrømmen y Kvalem, 1996). Se pueden presentar, por ejemplo, los datos de: seguimiento de movimientos oculares del operador de reactor, seguimiento de movimientos oculares del operador de turbina, una cámara enfocando hacia el operador de reactor y una cámara enfocando al operador de turbina.
- Dos equipos de recogida de datos de seguimiento de movimientos oculares.
- Canales de micrófonos para registrar en la galería las explicaciones de los expertos en proceso.
- Sistema de micrófonos inalámbricos (cuatro micrófonos), que operan en una banda de frecuencia que está poco influida por el ruido externo o la interferencia de otras transmisiones. Los tres operadores disponían de micrófono en las sesiones de toma de datos.
- Mezclador avanzado y flexible de audio, que proporciona 16 canales de input y 8 de output. Las diferentes fuentes de sonido pueden ser balanceadas, mezcladas y distribuidas en cualquier combinación.
- Monitores de TV de 29 pulgadas de alta calidad, para sesiones de supervisión y análisis de datos.
- *Monitores esclavos* de 14 pulgadas para monitorizar los displays de las pantallas seleccionadas en la sala de control.

9.5.4.3 Equipo de seguimiento de movimientos oculares

A continuación se definen las principales características del equipo de recogida de datos y del equipo de puntuación para el análisis de los datos recogidos y, por último, se incluyen algunas consideraciones sobre las limitaciones de los equipos de seguimiento de movimientos oculares.

9.5.4.3.1 Equipo de recogida de datos de movimientos oculares

Incluye el *software* y el *hardware* del equipo de seguimiento de movimientos oculares del modelo ASL 4000 SU ligeramente modificado, un ordenador con monitor, dos monitores de vídeo y una superficie de calibración. Se emplearon dos equipos de seguimiento de movimientos oculares del modelo ASL, proporcionando medidas de tiempo real del punto de visión a 50 Hz (Drøvoldsmo et al., 1998; Skraaning y Andresen, 1999). Los equipos registraron el reflejo de la pupila y de la córnea a través de una cámara de infrarrojos. La cámara a color se acopló a un casco que llevaron los operadores, proporcionando la situación vista por los participantes (Skraaning y Andresen, 1999).

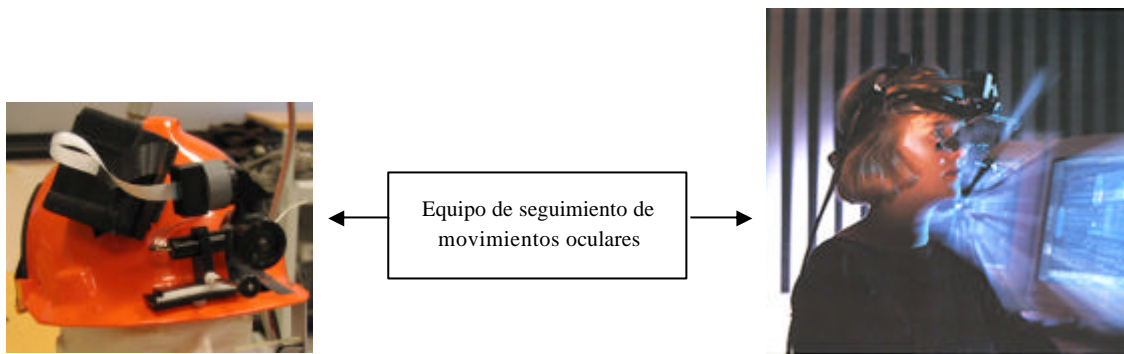


Figura 9-25. Equipo de seguimiento de movimientos oculares.

Inicialmente se llevó a cabo el procedimiento de calibración del equipo de seguimiento ocular, adaptado a cada operador, para asegurar el correcto seguimiento de los ojos del operador. En la cinta de vídeo resultante de la grabación con la cámara, la línea de visión se muestra en forma de una cruz que se va desplazando sobre la interfaz de usuario en función del punto de fijación del operador.

9.5.4.3.2 *Equipo de puntuación de datos de movimientos oculares*

El equipo de puntuación de los datos de seguimiento ocular se basa en las grabaciones en vídeo de la actividad visual de los operadores. La estación de puntuación EyeCon se muestra en la figura 9-26 e incluye: el *software* EyeCon instalado en un ordenador, un teclado del tipo sensible al tacto, un monitor de televisión de gran tamaño y un vídeo semiprofesional (S VHS 625 - VHS Pal. Hi-Fi. *Video-cassete Recorder* SVO-5800P) (Jokstad et al., 2002).



Figura 9-26. Estación de Puntuación EyeCon.

El *software* EyeCon Pro 2.0, *Video Eye Movements Analysis*, desarrollado por el Proyecto Halden, se ha empleado para la puntuación de los datos de movimientos oculares. El *software* permite definir una plantilla en el área de formato de plantillas, realizar la puntuación en el área de formato de registros, así como incluir comentarios o protocolos verbales en el área de formato verbal.

El análisis de seguimiento ocular requiere una cuidadosa planificación. Antes de comenzar el registro de datos, hay que crear una plantilla para definir las áreas del teclado que representan las AOI de la actividad visual del operador en la interfaz del sistema. El evaluador presiona en el AOI

correspondiente en el teclado sensible al tacto, para registrar el acceso visual. Las entradas se registran con el *software* EyeCon en base a códigos temporales, creando unos registros de datos brutos en el formato que se muestra, a modo de ejemplo, en la tabla 9-14. El *software* EyeCon está sincronizado con el vídeo, lo que permite un registro sistemático de las AOI de la actividad visual del operador.

Tabla 9-14. *Extracto de las Hojas de Registro de EyeCon*

Tiempo	Número del AOI	Denominación del área de interés (AOI)
0:08:18	19	ALARM TILE OVERVIEW SCREEN
0:08:20	3	REACTOR AND PRIMARY. LARGE SCREEN OVERVIEW
0:08:21	25	NORS, SCREEN 1 (RIGHT)
0:08:27	12	VALUES IN THE TREND OVERVIEW SCREEN
0:08:28	16	ALARM MESSAGE TEXT IN THE ALARM LIST OVERVIEW SCREEN

El teclado sensible al tacto es de mayor tamaño que un teclado estándar de ordenador. Las dimensiones del teclado son aproximadamente de 38 x 23 *cm*, mientras que cada AOI está definida en un campo de 4,5 x 2,5 *cm*. Existen teclas predefinidas de acceso directo en el teclado de la estación de puntuación de datos de seguimiento ocular, controladas por el *software* EyeCon, con el objeto de facilitar la puntuación, como se muestra en la figura 9-27, permitiendo rebobinar la cinta de vídeo durante 10, 20, 30 o 40 *s*.

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
			REW	Play	Pause	Stop	FWD	10sg	20sg	30sg	40sg

Figura 9-27. Teclas de función de acceso directo del teclado sensible al tacto.

9.5.4.3.3 Limitaciones de los datos de seguimiento de movimientos oculares

Los aparatos de seguimiento de movimiento ocular presentan una serie de limitaciones, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Son exactos dentro de un grado del punto de mirada real (Byrne et al, 1999 citado en Poole y Ball, 2005), por lo que la atención puede dirigirse también, sin mover los ojos, un grado fuera de la mirada (Jacob y Karn, 2003).
- No todos los individuos pueden someterse a las pruebas (Poole y Ball, 2005), aproximadamente el 10-20% de los participantes (Jacob y Karn, 2003), siendo esencial el proceso de calibración del equipo. Hay que disminuir la intrusión del equipo de seguimiento de movimientos oculares haciendo que los participantes se sientan más cómodos, por ejemplo, con el uso de equipos acoplados a la cabeza, pequeños y ligeros (Poole y Ball, 2005).
- Son unos instrumentos muy sensibles que pueden presentar dificultades con participantes que empleen lentes de contacto o gafas (Goldberg, 1999; Poole y Ball, 2005), siendo necesario adaptar la calibración del equipo a cada operador (Ergoestudio, 2004b; Martínez Heras, 2007).
- Los movimientos de cabeza pueden dificultar la recogida de datos (Ergoestudio, 2004b; Hyrskykari, 2006; Martínez Heras, 2007).
- El procesamiento y el análisis de los datos de movimientos oculares suele ser largo y complicado. La integración de todos los datos, anotaciones, registros, grabaciones de imagen y de voz ofrecen un material muy rico y con un potencial analítico importante, pero puede tornarse excesivamente complejo (Ergoestudio, 2004b).

- La correcta interpretación de las pruebas requiere personal altamente cualificado y, la mayoría de las ocasiones, una importante inversión de tiempo y de paciencia para poder extraer beneficios significativos y prácticos (Ergoestudio, 2004b).

9.6 ANÁLISIS DE DATOS

El pre-procesamiento de seguimiento de movimientos oculares se realizó en las instalaciones del Proyecto Halden durante un período aproximado de cuatro meses. Inicialmente, se definieron los criterios de selección de los escenarios y los períodos de análisis en cada escenario. Se especificaron las reglas de codificación y el procedimiento de puntuación de los datos de seguimiento de movimientos oculares, y se determinaron las AOI a puntuar. La puntuación de los datos de seguimiento de movimientos oculares se llevó a cabo durante un período aproximado de tres meses.

9.6.1 Procesamiento de los datos

Inicialmente ha sido necesario llevar a cabo un proceso de conversión (transformación) de los datos de registros oculares y de los registros del simulador para permitir el análisis de datos en modelos experimentales de medidas repetidas y para los análisis cualitativos o descriptivos. Se han realizado las siguientes tareas:

- Revisión de registros del experimentador para establecer los períodos de los escenarios y, en cada período, identificar las alarmas mostradas a cada operador, incluyendo el tiempo de activación y desactivación de cada alarma, las acciones de comprimir, reconocer y silenciar realizadas por cada operador, la identificación de las acciones manuales de los operadores sobre los componentes, así como el momento de la selección de pantallas en la fila inferior de la estación de trabajo de cada operador.
- Visionado de las cintas de vídeo para identificar en cada período de los escenarios las pantallas seleccionados por los operadores en la fila inferior de las estaciones de trabajo, asimismo para identificar las fuentes de información empleadas por cada operador para la detección y el diagnóstico de los transitorios, poniendo un mayor énfasis en la utilización de las pantallas de alarmas.
- Transcripción de comentarios de los expertos en el proceso NORS sobre la actuación de los operadores así como anotaciones de aspectos relevantes de la actuación de los operadores identificados durante la etapa de puntuación de los datos de seguimiento de movimientos oculares.

9.6.2 Técnicas de análisis de datos

Se ha realizado un análisis de datos exploratorio sobre la influencia de las fijaciones (frecuencia y duración) en las AOI del sistema de alarma CASH, así como su relación con el resto de AOI. Se han aplicado también diversas técnicas cuantitativas, estando las principales conclusiones basadas en resultados estadísticamente significativos. El *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*), versión 19, de la facultad de Psicología de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y del CIEMAT ha sido empleado para el análisis de los datos.

Un resumen de las principales técnicas empleadas para el análisis de datos es:

- Estadísticos descriptivos y distribución de frecuencias de las AOI en los tres escenarios. Las AOI se muestran inicialmente en treinta áreas, siendo posteriormente agrupadas en doce áreas, asimismo el sistema de alarma se muestra distribuido en cinco áreas (cuatro de la lista de alarmas y una de las alarmas en ventanilla).
- El orden del escenario, del equipo y de la interacción del orden del escenario y el equipo ha sido analizado empleando un modelo del componente de la varianza, considerando como factores aleatorios tanto el orden del escenario como el equipo.
- El efecto del rol del operador se ha analizado por medio de t-test de Student, análisis de varianza (ANOVA) medidas repetidas y el test no paramétrico Mann-Whitney.
- Correlaciones Pearson entre los datos de frecuencia y duración del sistema de alarma, alarmas en ventanillas, lista de alarmas y las cuatro AOI de la lista de alarmas, entre-escenarios e intra-escenarios a nivel de equipo y por puesto.
- Descriptivos del porcentaje de tiempo de dedicación a las AOI del sistema de alarma.
- Descriptivos del tiempo empleado en la detección de la anomalía.
- Descriptivos de la fuente de información usada en la detección de la anomalía.
- Análisis de tendencias del tiempo de duración en el sistema de alarmas durante el desarrollo del escenario para explorar los roles del sistema de alarmas.
- Análisis de tendencia del tiempo de duración en el sistema de alarmas durante la etapa de detección de anomalías para explorar si se produce una tendencia cuadrática.
- El efecto del escenario en los datos de duración y de frecuencia de las AOI del sistema de alarma ha sido explorado con un análisis intra-escenario. Se han realizado series de t-test de Student, medidas repetidas, para muestras relacionadas en cada AOI de los tres escenarios, cubriendo el sistema de alarma, la lista de alarmas y las alarmas en ventanilla y, por último, las cuatro áreas de la lista de las alarmas y las alarmas en ventanilla, empleando el test de Levene para la igualdad de varianzas.
- ANOVA de medidas repetidas, con un factor de efectos fijos y un factor de medidas repetidas se ha utilizado para explorar los posibles efectos de interacción entre las AOI del sistema de alarma y el rol del operador (reactor y turbina) en los datos de duración y de frecuencia de cada escenario. Los datos de duración y de frecuencia han sido analizados con diseños inter-escenarios e intra-escenarios. El diseño inter-escenarios ha tratado los datos de duración y de frecuencia de: el sistema de alarma, las alarmas en ventanilla, la lista de alarmas y las cuatro AOI de la lista de alarmas, considerando simultáneamente los tres escenarios. Los diseños intra-escenarios se han aplicado a los datos de duración y de frecuencia de la lista de alarmas y de las alarmas en ventanilla en cada escenario; también se ha considerado el contenido del mensaje de la lista de alarmas (código identificador, texto, valor y tiempo y otras partes de la lista de alarmas) y las alarmas en ventanilla en cada uno de los escenarios.
- ANOVA de medidas repetidas, con efectos fijos (modelo 2x2), se ha empleado para explorar los posibles efectos de interacción entre el sistema de alarma (listas y ventanillas) y el rol del operador (reactor y turbina) en los datos de duración y de frecuencia en los períodos de los tres escenarios.
- ANOVA de medidas repetidas, con efectos fijos (modelo 2x5), se ha empleado para explorar los posibles efectos de interacción entre las cinco AOI del sistema de alarma (código identificador, texto, valor, tiempo y otras partes de la lista de alarmas y alarmas en ventanillas) y el rol del operador (reactor y turbina) en los datos de duración y de frecuencia en los períodos de los tres escenarios.

- ANOVA de medidas repetidas se han realizado para explorar la relación entre la experiencia de los operadores y las fijaciones realizadas a las áreas del mensaje de la lista de alarmas relativas al código identificador y al texto de la alarma.
- El número de acciones de afrontamiento de alarmas, comprimir, reconocer y silenciar, así como el uso de opciones globales frente a por puesto de operación para reconocer y comprimir, se ha explorado con datos descriptivos, correlaciones Pearson y ANOVA de medidas repetidas.

Así mismo, se ha realizado un análisis cualitativo de datos de los seis equipos de operación en cada uno de los escenarios, necesario para explorar algunas de las hipótesis de la investigación. En el apartado de resultados y en el apéndice F se explicita el afrontamiento de los distintos transitorios por el equipo de operación en función del tiempo de ocurrencia, la fuente de información empleada para la detección, el diagnóstico y la realización de las acciones correctoras.

10 RESULTS

Before exposing the results, we briefly summarize how the raw data were converted for analyzing the hypotheses or research questions.

The EyeCon Scoring Station was used for the scoring of eye movement tracking data (see Figure 9-26). The measures of frequency and duration of the AOIs are estimated from records of eye movements that show the operator's attention. The eye tracking data are visualized as a moving cross-hair superimposed over the scene cameras' image, representing a real-time measurement of the point of gaze of the operator, which identifies when and where the operator is glancing in the interface (see an example in Table 9-14). The scorer pressed a touch-button in the keyboard every time the cross-hair enters and leaves every AOI (see touch sensitive keyboard in Figure 9-2). The frequency data refers to the number of visual accesses per time unit to the AOIs, the number of fixations in the AOI (i.e., every time that the cross-hair enters an AOI). The duration data estimate the percentage of time gazing at the AOI (i.e., the time at which the operator's eye enters the AOI until it leaves the AOI). In all findings, there are presented, in first place, the number of visual accesses, and afterwards, the amount of time (i.e., dwell time) on the AOIs.

The reactor and turbine operators used the eye tracking equipment. Therefore, the data estimated for the crew are averaged over the reactor and turbine operators. The shift supervisor position is not considered in the analyses.

We mainly provide this explanation for supporting the non-Spanish readers in understanding the core of this research project.

In the section of results, firstly, descriptive statistic, Pearson correlations, and normality tests are included, secondly presenting the research questions, predictions and hypothesis of the experimental study.

The hypotheses are formulated based on state-of-the-art review and in our experience on alarm system design and evaluation in simulators of NPP control rooms. A total of thirteen hypotheses or research questions are defined and analyzed. The primary focus is on the presentation of alarm information and how operators use the alarm system in the control room.

Each of the three scenarios lasted around 45 minutes. The alarm-related data cover a total time of approximately 135 minutes per operator (i.e., 45 minutes and 3 scenarios). Two operators of every crew used the eye tracking equipment: 270 minutes per crew (reactor and turbine operators). In the experiment, the total time of the eye movement data is 1620 minutes (i.e., 27 hours).

The analysis of the visual activity of the operators in the complete HSI of the control room (thirty and twelve AOIs of the interface, see Table 9-4) was performed for specific periods within the scenario (from now, scenario period) representing alarm-related criteria (see the criteria in 9.4.2.2.3). The selected periods are 29 and a half minutes in the first scenario (from the minute 5:30 to 35), 26 minutes in the second scenario (from the minute 4 to 30), and 27 minutes in the third scenario (from the minute 8 to 35). The HSI-related data cover 82 and a half minutes per operator, and 165 minutes per crew. In the experiment, the total time of the eye movement data in the complete interface is 990 minutes (i.e., 16.5 hours).

10.1 DESCRIPTIVE STATISTICS

The mean score of the alarm areas of interest as well as of thirty AOIs⁶¹ and twelve AOIs⁶² of the HSI of control room simulator (see Table 9-4) are presented.

10.1.1 Descriptive statistics of frequency and duration data of alarm areas of interest

The descriptive statistics on frequency and duration data, based on the operator role and the scenario type, are included in the subsections 10.1.1.1 and 10.1.1.2. The descriptive data, at the crew level (averaged data of the operators), are in detailed presented later regarding the hypothesis on the percentage of time spent monitoring the alarm system AOIs. Notwithstanding, the average percentages of the frequency and duration data of the crews are included in the subsection 10.1.1.3.

The number of visual accesses and the amount of time spent on the alarm AOIs has been obtained taking into account the total scenario time, i.e., approximately 45 minutes.

The descriptive statistics of the alarm system AOIs are presented for: the four AOIs of the chronologically organized alarm list (alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of the alarm list), two alarm displays (alarm list and alarm tile), and alarm system. This is, “the alarm message content of the alarm list, previously described in the method section, has been grouped in four areas of interest: alarm tag (refers to the alarm identifier tag), alarm text (refers to alarm message description including the alarm severity), alarm value (refers to current value, alarm limit and engineering unit), and other parts of alarm lists (covers visual annunciator, time of occurrence of when the alarm became active, and others) (Torralba, Martínez-Arias and Solá, 2007, p. 95).”

⁶¹ The thirty AOIs are CFMS, volume and boric, reactor and primary, secondary, other alternatives in the large screen overview, plant protection, emergency, power balance, electrical and diesel, lower row of the operators' screens, large screen overview, overview trends, overview values, automation, ALDIV system, alarm tag, alarm message text, alarm value, time and other parts in the alarm list, alarm tile, other operator's screens, visual communication, NORS1, NORS2, NORS3, NORS4, anything else or not specified, read procedure, verify if using procedures, selected trends, and selected values.

⁶² The twelve AOIs are large screen, overview trends, automation, ALDIV, alarm list, alarm tile, other operator's screens, visual communication, NORS process formats, anything else or not specified, procedures, and selected trends.

10.1.1.1 Exploring frequency results of alarm AOIs based on operator role

It should be noted that in the calculation of the frequency data was considered that the alarm list AOI is composed of four alarm AOIs (tag, text, value, and time and other parts of alarm list). Therefore, each time that the operator accessed sequentially from an alarm list AOI to another alarm list AOI, this was scored as one frequency value, because the operator still gazed at the alarm list display. For example, if sequentially the operator looked at the alarm text, the alarm tag and the alarm value, the alarm list frequency data were estimated as a one score, instead of three.

The frequency data of the six reactor operators (ROs) in scenarios 1, 2 and 3 when they monitor the alarm system AOIs are in Tables 10-1, 10-2 and 10-3, respectively.

Table 10-1. *Frequency Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1*

Alarm AOIs	Reactor Operator of Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.30	0.89	3.00	1.52	1.33	1.41	1.57
<i>Alarm Text</i>	1.67	1.15	3.15	3.59	2.04	8.30	3.31
<i>Alarm Value</i>	0.48	0.07	1.22	0.56	0.41	2.63	0.90
<i>Other Parts</i>	0.81	1.04	0.41	0.41	0.48	0.48	0.60
Alarm List	2.37	1.74	2.81	3.70	2.22	7.63	3.41
Alarm Tile	3.15	1.78	1.41	2.89	2.78	3.37	2.56
Alarm System	5.52	3.52	4.22	6.59	5.00	11.00	5.98

Table 10-2. *Frequency Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2*

Alarm AOIs	Reactor Operator of Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	2.37	1.85	4.74	0.47	1.22	2.74	2.23
<i>Alarm Text</i>	4.11	1.81	4.70	5.97	2.93	7.56	4.51
<i>Alarm Value</i>	1.33	0.70	1.11	2.36	0.30	1.89	1.28
<i>Other Parts</i>	1.70	2.52	1.85	1.24	2.52	1.81	1.94
Alarm List	5.59	3.41	3.70	6.36	4.63	7.26	5.16
Alarm Tile	3.67	2.70	2.07	4.53	4.00	3.30	3.38
Alarm System	9.26	6.11	5.78	10.89	8.63	10.56	8.54

Table 10-3. *Frequency Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3*

Alarm AOIs	Reactor Operator of Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.89	1.04	3.48	1.78	2.37	4.44	2.50
<i>Alarm Text</i>	3.37	0.56	4.30	4.63	4.11	7.89	4.14
<i>Alarm Value</i>	0.67	0.26	2.33	0.96	1.19	3.19	1.43
<i>Other Parts</i>	0.67	0.93	0.74	1.15	1.85	1.04	1.06
Alarm List	3.70	1.59	3.15	5.04	3.93	7.48	4.15
Alarm Tile	3.15	1.74	1.15	4.63	3.81	4.89	3.23
Alarm System	6.85	3.33	4.30	9.67	7.74	12.37	7.38

The frequency alarm data of the turbine operators (TOs) on each scenario are described in Tables 10-4, 10-5 and 10-6.

Table 10-4. *Frequency Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1*

Alarm AOIs	Turbine Operator of Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.93	0.56	0.93	2.19	1.22	1.44	1.38
<i>Alarm Text</i>	4.37	1.59	3.93	5.26	1.89	2.11	3.19
<i>Alarm Value</i>	1.78	0.33	1.48	0.96	0.37	0.37	0.88
<i>Other Parts</i>	0.56	0.37	0.30	0.04	0.00	0.19	0.24
Alarm List	3.93	1.56	3.19	4.41	1.33	1.89	2.72
Alarm Tile	1.48	1.04	1.52	2.70	1.15	0.59	1.41
Alarm System	5.41	2.59	4.70	7.11	2.48	2.48	4.13

Table 10-5. *Frequency Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2*

Alarm AOIs	Turbine Operator of Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	0.52	1.63	0.59	1.12	1.89	1.59	1.22
<i>Alarm Text</i>	1.19	2.89	3.44	3.41	3.15	2.15	2.71
<i>Alarm Value</i>	0.63	1.33	1.33	0.93	0.93	0.07	0.87
<i>Other Parts</i>	0.07	0.81	0.56	0.47	0.56	0.19	0.44
Alarm List	1.04	2.00	3.04	3.26	2.59	2.00	2.32
Alarm Tile	0.89	1.52	1.70	2.52	1.48	0.81	1.49
Alarm System	1.93	3.52	4.74	5.78	4.07	2.81	3.81

Table 10-6. *Frequency Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3*

Alarm AOIs	Turbine Operator of Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	2.37	0.56	0.56	1.11	1.07	1.30	1.16
<i>Alarm Text</i>	4.59	1.11	2.19	3.00	1.11	1.33	2.22
<i>Alarm Value</i>	2.00	0.48	0.74	0.93	0.30	0.33	0.80
<i>Other Parts</i>	0.63	0.07	0.22	1.00	0.26	0.11	0.38
Alarm List	4.11	0.85	2.11	3.37	1.30	1.56	2.22
Alarm Tile	2.30	0.41	1.22	2.26	0.89	0.81	1.31
Alarm System	6.41	1.26	3.33	5.63	2.19	2.37	3.53

10.1.1.2 Exploring duration results of alarm AOIs based on operator role

Tables 10-7, 10-8 and 10-9 show the percentage of time that the six reactor operators spend in the alarm system AOIs in the scenarios 1, 2, and 3, respectively.

Table 10-7. *Duration Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1*

Alarm AOIs	Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.35	0.81	3.34	1.29	1.23	1.30	1.55
<i>Alarm Text</i>	1.85	2.15	4.02	6.52	3.43	11.89	4.98
<i>Alarm Value</i>	0.34	0.15	1.46	0.44	0.53	2.37	0.88
<i>Other Parts</i>	0.65	1.15	0.40	1.10	0.39	0.56	0.71
Alarm List	4.18	4.26	9.22	9.36	5.58	16.11	8.12
Alarm Tile	4.57	3.81	2.38	4.02	3.45	2.49	3.46
Alarm System	8.76	8.07	11.60	13.38	9.03	18.60	11.57

Table 10-8. *Duration Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2*

Alarm AOIs	Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	2.14	1.73	4.39	0.34	0.97	1.93	1.92
<i>Alarm Text</i>	4.49	3.30	5.43	8.78	3.70	8.02	5.62
<i>Alarm Value</i>	1.23	0.91	0.81	2.16	0.37	1.46	1.16
<i>Other Parts</i>	2.31	3.80	1.88	1.10	2.80	1.17	2.18
Alarm List	10.17	9.73	12.52	12.39	7.84	12.58	10.87
Alarm Tile	4.11	3.72	2.92	5.42	3.48	2.36	3.67
Alarm System	14.28	13.45	15.43	17.81	11.32	14.94	14.54

Table 10-9. *Duration Data of Reactor Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3*

Alarm AOIs	Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.81	1.13	3.13	1.47	1.97	3.51	2.17
<i>Alarm Text</i>	3.96	0.91	5.02	5.41	5.40	6.49	4.53
<i>Alarm Value</i>	0.48	0.28	2.51	0.89	1.35	2.21	1.29
<i>Other Parts</i>	0.41	1.06	0.60	1.13	2.05	0.74	1.00
Alarm List	6.66	3.38	11.27	8.90	10.77	12.96	8.99
Alarm Tile	2.90	2.00	2.10	4.75	4.87	3.49	3.35
Alarm System	9.56	5.38	13.37	13.65	15.64	16.45	12.34

The duration data of six turbine operators on each scenario are described in Tables 10-10, 10-11 and 10-12.

Table 10-10. *Duration Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 1*

Alarm AOIs	Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.66	0.49	0.68	1.53	1.72	2.46	1.43
<i>Alarm Text</i>	3.54	3.09	5.10	5.11	2.72	2.66	3.70
<i>Alarm Value</i>	1.34	0.31	1.42	0.66	0.33	0.63	0.78
<i>Other Parts</i>	0.30	0.44	0.33	0.02	0.00	0.08	0.19
Alarm List	6.84	4.35	7.53	7.32	4.78	5.83	6.11
Alarm Tile	1.16	2.02	1.76	2.47	1.90	1.05	1.73
Alarm System	8.00	6.36	9.29	9.80	6.68	6.88	7.84

Table 10-11. *Duration Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 2*

Alarm AOIs	Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	0.38	1.24	0.44	0.81	2.78	2.94	1.43
<i>Alarm Text</i>	1.09	3.20	4.18	3.80	4.42	2.41	3.18
<i>Alarm Value</i>	0.59	0.94	1.29	0.65	0.64	0.11	0.70
<i>Other Parts</i>	0.06	1.03	1.33	0.28	0.48	0.12	0.55
Alarm List	2.11	6.41	7.24	5.54	8.31	5.59	5.87
Alarm Tile	0.69	2.72	1.93	2.07	2.29	0.86	1.76
Alarm System	2.80	9.12	9.17	7.61	10.60	6.44	7.62

Table 10-12. *Duration Data of Turbine Operators Looking at Alarm AOIs in Scenario 3*

Alarm AOIs	Crew						Mean
	Crew 1	Crew 2	Crew 3	Crew 4	Crew 5	Crew 6	
<i>Alarm Tag</i>	1.85	0.63	0.44	0.73	1.70	2.44	1.30
<i>Alarm Text</i>	4.05	1.24	3.29	2.59	1.86	1.60	2.44
<i>Alarm Value</i>	2.02	0.40	0.57	0.82	0.24	0.29	0.72
<i>Other Parts</i>	0.49	0.06	0.10	1.23	0.30	0.09	0.38
Alarm List	8.42	2.33	4.40	5.37	4.10	4.42	4.84
Alarm Tile	1.88	0.56	1.34	2.18	1.14	0.85	1.32
Alarm System	10.30	2.89	5.74	7.55	5.23	5.27	6.16

10.1.1.3 Average of frequency and duration data of alarm AOIs

Finally, the average percentages of the frequency data and the duration data, at the crew level, have been estimated for the four AOIs of the alarm list and the alarm tile.

Figures 10-1 and 10-2 represent average of the number of visual accesses and the percentage of time spent in the alarm AOIs, respectively. Not large differences are appreciated in data distribution of the frequency and duration of the alarm AOIs. The percentage of allocation of visual activity is, in decreasing order, as follows: alarm text, alarm tile, alarm tag, alarm value, and time and other parts of the alarm list.

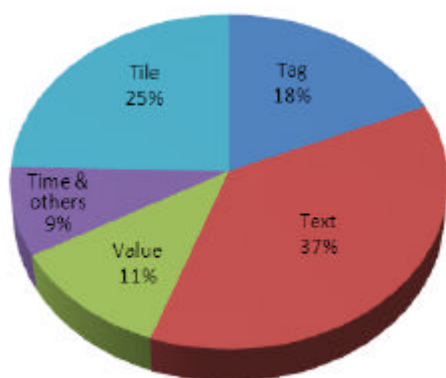


Figure 10-1. Average percentage of frequency data of four AOIs of alarm list and alarm tile.

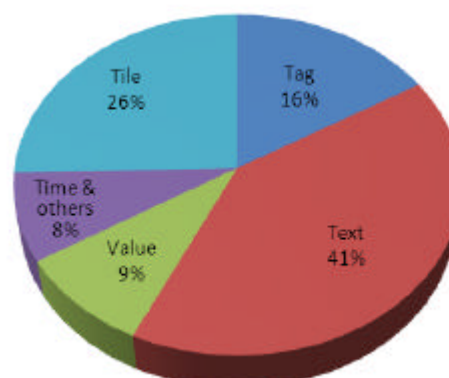


Figure 10-2. Average percentage of duration data of four AOIs of alarm list and alarm tile.

10.1.2 Descriptive statistics of frequency and duration data of thirty and twelve AOIs

The descriptive statistics of the frequency and duration data of the HSI control room of thirty AOIs and twelve AOIs (see Table 9-4), identified in the study, are summarized in this section. The frequency and duration on the AOIs was calculated for each operator individually, and then derived as averages over those estimates. The mean scores of the thirty and the twelve AOIs are available for the reader in the tables of Appendix C.

The frequency and duration data cover 29 and a half minutes in the first scenario, 26 minutes in the second scenario, and 27 minutes in the third scenario, as previously explained (see 9.4.2.2.3).

10.1.2.1 Descriptive analyses of frequency data of 12 AOIs

The amount of visual accesses per time unit –frequency data– has been calculated for six reactor operators and six turbine operators in all three scenarios. The data are average percentages, which have been estimated for each operator as absolute values of the twelve AOIs, which represent the displays (HSI) of the control room NORS simulator.

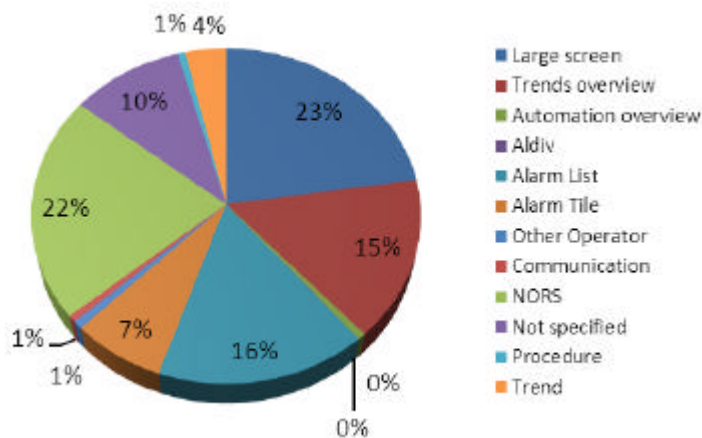
It should be noted that the process followed for the calculation of frequency data has consisted in represent all accesses to any of the AOIs which constitute a part of the grouped AOI in the case of the large screen overview, trends (time-based data curves) overview, alarm list, NORS process formats, procedures and selected trends.

The mean of the operator's frequency data in twelve AOIs is shown between Figure 10-3 and Figure 10-8. The results are explained by emphasizing the highest and the lowest values of the amount of visual accesses.

10.1.2.1.1 Frequency data of 12 AOIs in scenario 1

The number of visual accesses of six reactor operators and six turbine operators in the selected period of the scenario 1 is in Figures 10-3 and 10-4, respectively.

Figure 10-3 shows the mean score of the frequency data of six reactor operators in the scenario 1 for twelve AOIs.

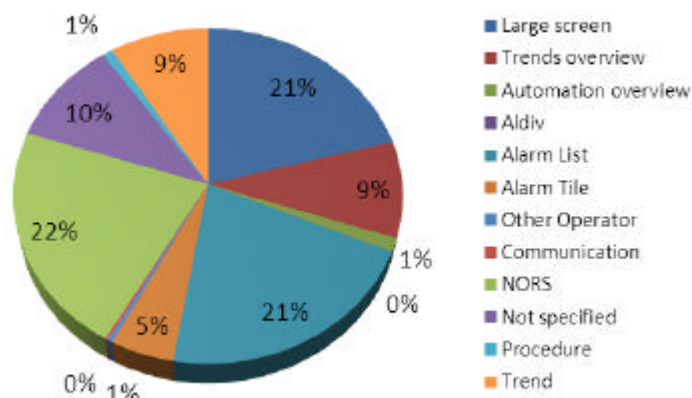


The number of visual accesses of the reactor operators in the scenario 1 was higher when looking at the large screen (volume & boric, reactor & primary, and CFMS), NORS process formats, alarm list, and trends at the overview level.

The amount of visual accesses was rather reduced in automation, Aldiv, visual communication, turbine operators' screens, procedures as well as in the selected trends.

Figure 10-3. Mean of twelve AOIs frequency data of reactor operators in scenario 1.

Figure 10-4 shows the mean score of the frequency data of six turbine operators in the scenario 1 for twelve AOIs.



The number of visual accesses of the turbine operators in the scenario 1 was higher when looking at the NORS process formats, alarm list, and large screen (mainly secondary, followed by reactor & primary).

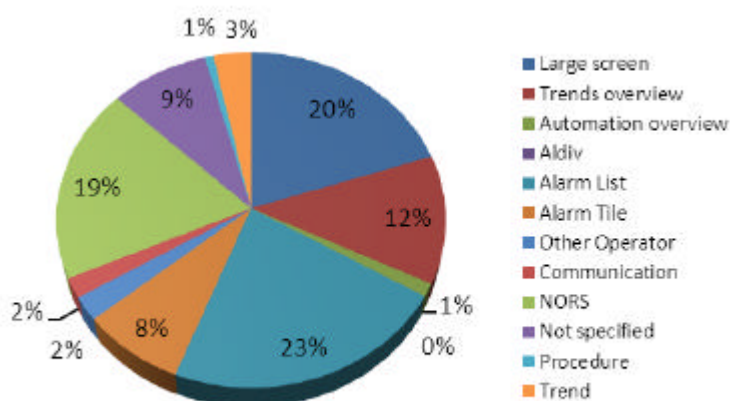
A few visual accesses occurred in the AOIs of automation, Aldiv, visual communication, reactor operators' screens, and procedures.

Figure 10-4. Mean of twelve AOIs frequency data of turbine operators in scenario 1.

10.1.2.1.2 Frequency data of 12 AOIs in scenario 2

The number of visual accesses of six reactor operators and six turbine operators in the selected period of the scenario 2 is described in Figures 10-5 and 10-6, respectively.

Figure 10-5 shows the mean score of the frequency data of six reactor operators in the scenario 2 for twelve AOIs.

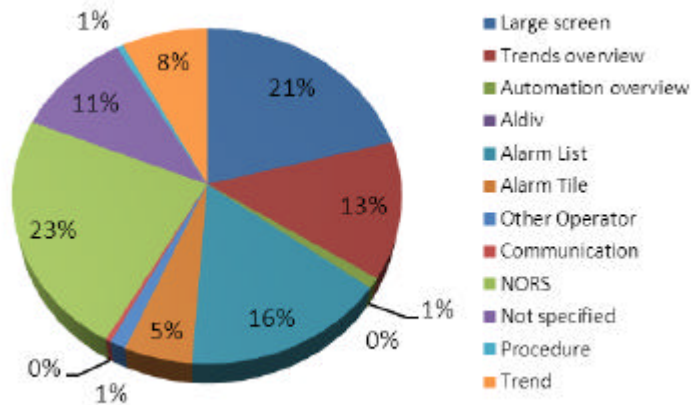


The number of visual accesses of reactor operators in the scenario 2 was higher when looking at the alarm list, large screen (reactor & primary, volume & boric, and secondary), and NORS process formats.

A reduced amount of visual accesses happened in automation, Aldiv, visual communication, turbine operators' screens, procedures as well as on selected trends.

Figure 10-5. Mean of twelve AOIs frequency data of reactor operators in scenario 2.

Figure 10-6 shows the mean score of the frequency data of six turbine operators in the scenario 2 for twelve AOIs.



The number of visual accesses of the turbine operators in the scenario 1 was higher looking at the NORS process formats, large screen (mainly secondary, followed by reactor & primary), alarm list, and trends at the overview level.

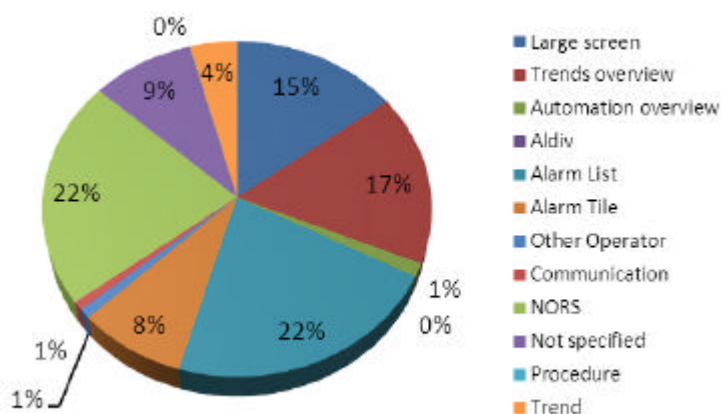
The amount of visual accesses was rather limited in automation, Aldiv, visual communication, reactor operators' screens, and procedures.

Figure 10-6. Mean of twelve AOIs frequency data of turbine operators in scenario 2.

10.1.2.1.3 Frequency data of 12 AOIs in scenario 3

The number of visual accesses of six reactor operators and six turbine operators in the selected period of the scenario 3 is presented in Figures 10-7 and 10-8.

Figure 10-7 shows the mean score of the frequency data of six reactor operators in the scenario 3 for twelve AOIs.

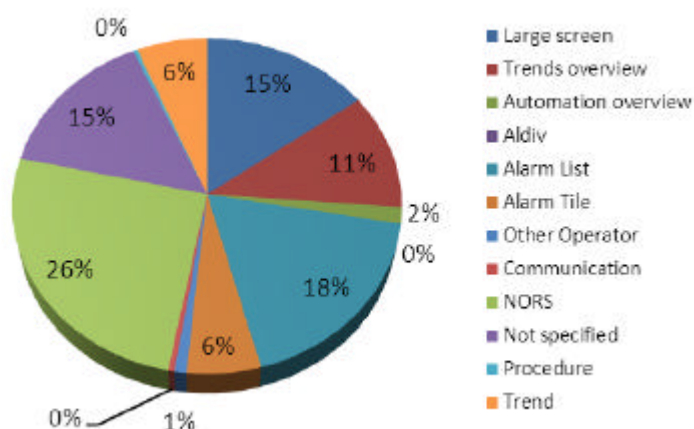


The number of visual accesses of the reactor operators in scenario 3 was higher when looking at the alarm list, NORS process formats, trends at the overview level, and large screen (reactor & primary, volume & boric, and secondary).

Few visual accesses occurred in automation, Aldiv, visual communication, turbine operators' screens, procedures, and selected trends.

Figure 10-7. Mean of twelve AOIs frequency data of reactor operators in scenario 3.

Figure 10-8 shows the mean score of the frequency data of six turbine operators in the scenario 3 for twelve AOIs.



The number of visual accesses of the turbine operators in scenario 3 was higher when looking at the NORS process formats, alarm list, large screen (secondary and then reactor & primary), and not specified.

The amount of visual accesses was rather reduced in automation, Aldiv, visual communication, reactor operators' screens, and procedures.

Figure 10-8. Mean of twelve AOIs frequency data of turbine operators in scenario 3.

10.1.2.2 Descriptive analyses of duration data of 12 AOIs

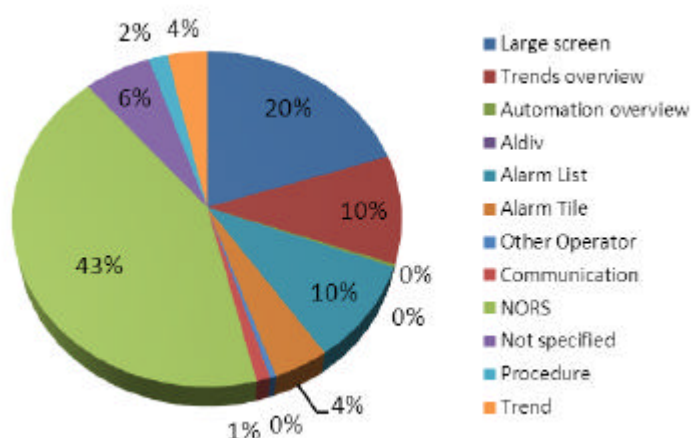
The percentage of time gazing at the twelve AOIs (i.e., duration data) was calculated for six reactor operators and six turbine operators in every scenario. The average percentages have been estimated for each operator as absolute values of the twelve AOIs, which represent the HSI displays of the control room NORS simulator.

The means of operators' duration data of twelve AOIs are exhibited between Figure 10-9 and Figure 10-14. The main findings are explained by emphasizing the highest and lowest scores, i.e., the displays where the operators spent more or less time searching for information.

10.1.2.2.1 Duration data of 12 AOIs in scenario 1

The percentage of time gazing at the AOIs of six reactor operators and six turbine operators in the selected period of the scenario 1 is discussed below.

Figure 10-9 shows the mean score of the duration data of six reactor operators in the scenario 1 for twelve AOIs.

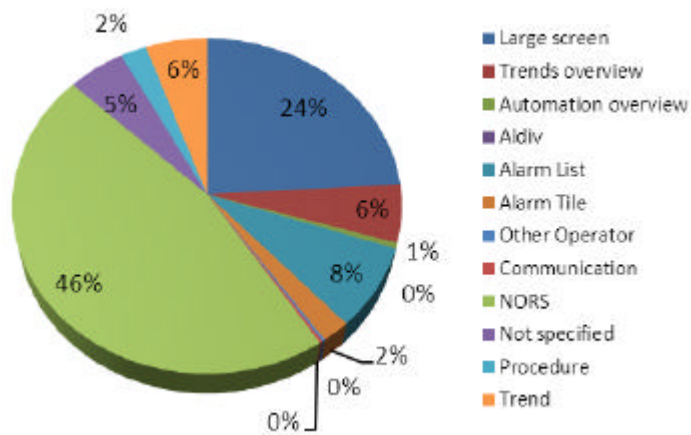


The percentage of time of reactor operators in the scenario 1 was higher when looking at the NORS process formats, large screen (volume & boric, and reactor & primary), alarm list and trends at the overview level.

The amount of time was rather reduced in the AOIs of automation, Aldiv, visual communication, turbine operators' screens, procedures as well as on selected trends.

Figure 10-9. Mean of twelve AOIs duration data of reactor operators in scenario 1.

Figure 10-10 shows the mean score of the duration data of six turbine operators in the scenario 1 for twelve AOIs.



The percentage of time of turbine operators in the scenario 1 was higher looking at the NORS process formats, large screen (secondary and after reactor & primary), and alarm list.

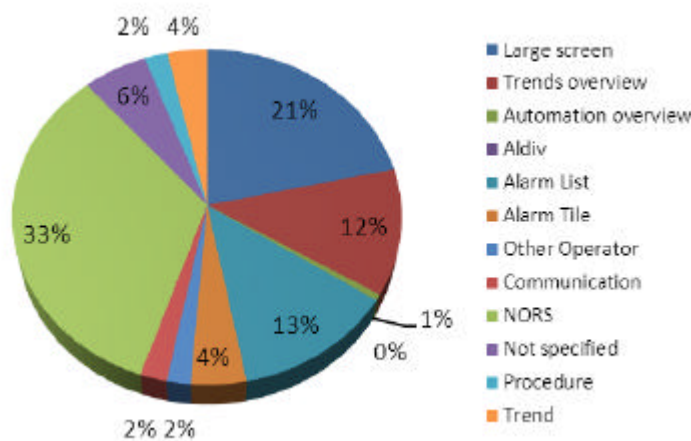
A short amount of time was spent in the AOIs of automation, Aldiv, alarm tile, visual communication, reactor operators' screens, and procedures.

Figure 10-10. Mean of twelve AOIS duration data of turbine operators in scenario 1.

10.1.2.2.2 Duration data of 12 AOIs in scenario 2

The percentage of time gazing at the alarm AOIs of six reactor operators and six turbine operators in the selected period of the scenario 2 are exposed in Figures 10-11 and 10-12, respectively.

Figure 10-11 shows the mean score of the duration data of six reactor operators in the scenario 2 for twelve AOIs.

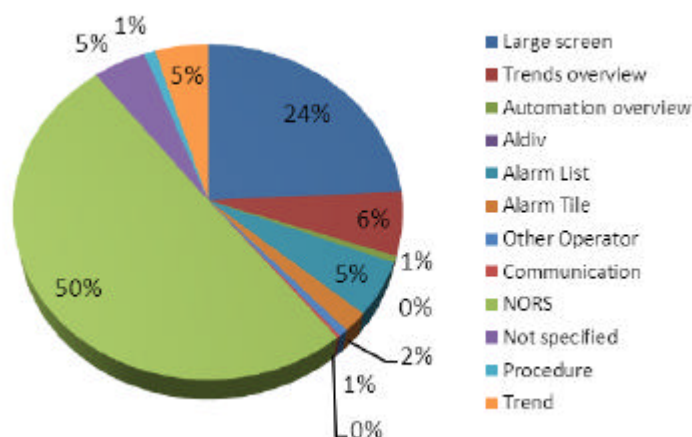


The percentage of time of the reactor operators in the scenario 2 was higher looking at the NORS process formats, large screen (secondary, reactor & primary, and volume & boric), alarm list and trends at the overview level.

A limited time was dedicated to the AOIs of automation, Aldiv system, alarm tile, visual communication, turbine operators' screens, procedures as well as on selected trends.

Figure 10-11. Mean of twelve AOIs duration data of reactor operators in scenario 2.

Figure 10-12 shows the mean score of the duration data of six turbine operators in the scenario 2 for twelve AOIs.



The percentage of time of turbine operators in the scenario 2 was higher when looking at the NORS process formats and the large screen (secondary and afterwards reactor & primary), and overview trends. Similar time was spent in the alarm list, not specified and the selected trends.

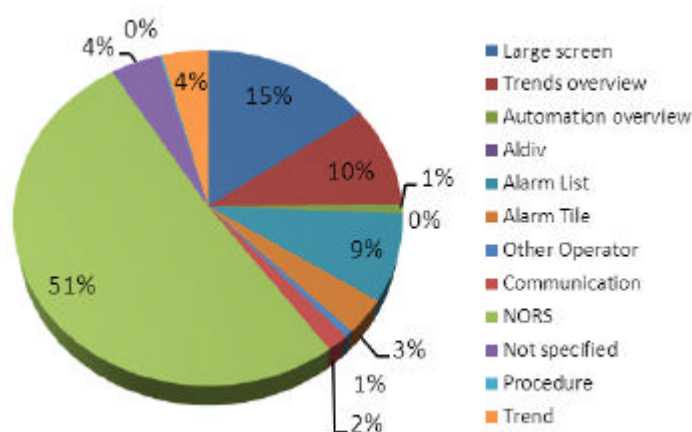
Short time was dedicated to follow the AOIs of automation, Aldiv, alarm tile, visual communication, reactor operators' screens, and procedures.

Figure 10-12. Mean of twelve AOIs duration data of turbine operators in scenario 2.

10.1.2.2.3 Duration data of 12 AOIs in scenario 3

The percentage of time gazing at AOIs of six reactor operators and six turbine operators in the selected period of the scenario 3 is presented in Figures 10-13 and 10-14, respectively.

Figure 10-13 presents the mean score of the duration data of six reactor operators in the scenario 3 for twelve AOIs.

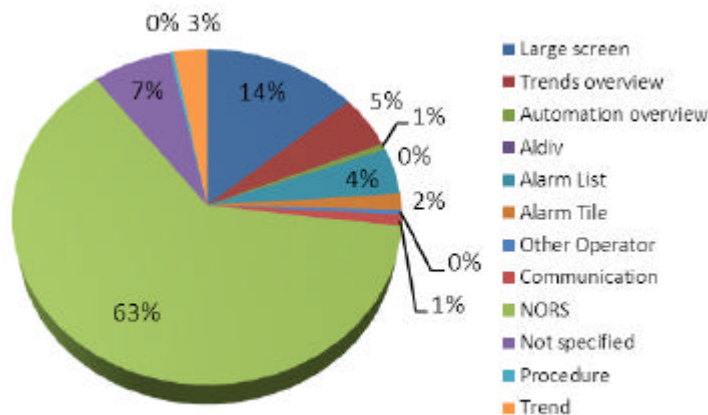


The percentage of time of the reactor operators in the scenario 3 was higher when looking at the NORS process formats, large screen (secondary, and reactor & primary), overview trends, and alarm list.

Short time was spent in automation, Aldiv, visual communication, turbine operators' screens, and procedures.

Figure 10-13. Mean of twelve AOIs duration data of reactor operators in scenario 3.

Figure 10-14 shows the mean score of the duration data of six turbine operators in the scenario 3 for twelve AOIs.



The percentage of time of the turbine operators in the scenario 3 was higher when looking at the NORS process formats, large screen (secondary, and then reactor & primary), overview trends, alarm list, and not specified.

The amount of time was rather reduced in automation, Aldiv, alarm tile, visual communication, reactor operators' screens as well as procedures.

Figure 10-14. Mean of twelve AOIs duration data of turbine operators in scenario 3.

10.1.2.3 Average of frequency and duration data of twelve AOIs of the HSI

To sum up, the average percentages of the crews' frequency and duration data have been estimated with twelve AOIs of the HSI of the advanced control room.

Figure 10-15 summarizes the average percentage of the number of visual accesses of the crews to the twelve AOIs of the HSI in all scenarios. The highest scores, above 13%, are found in the NORS process formats (20.84% of reactor operators versus 23.48% of turbine operators), the alarm list (20.26% versus 19.34%), the large screen overview (19.10% versus 18.89%), and the trends of the overview level (14.81% versus 11.25%).

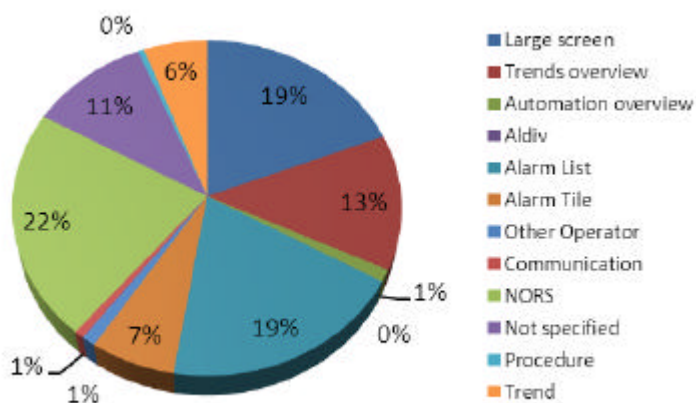


Figure 10-15. Average of means of twelve AOIs frequency data of crews in all scenarios.

Figure 10-16 shows the average percentage of the proportion of time of the crews to the twelve AOIs of the HSI in all scenarios. The highest scores, above 8%, are found in the NORS process formats (42.48% of reactor operators versus 53.13% of turbine operators), the large screen overview

(18.84% versus 20.64%), the alarm list (10.29% versus 5.91%), and the trends of the overview level (10.78% versus 5.59%).

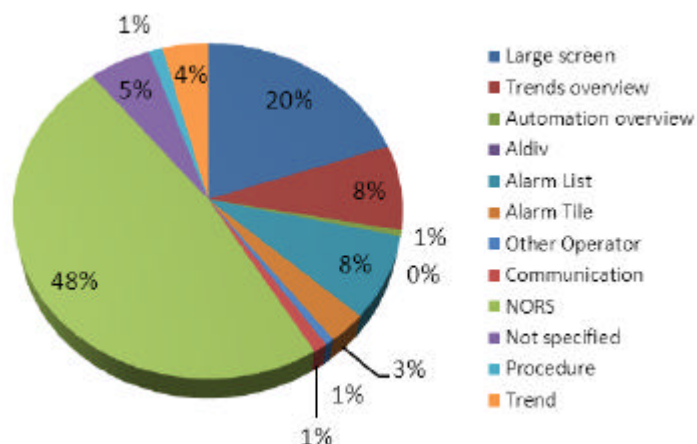


Figure 10-16. Average of means of twelve AOIs duration data of crews in all scenarios.

10.1.3 Descriptive statistics of frequency and duration data of process formats, large screen overview, trends and alarm system

In the previous subsection was observed that there are four main sources of information that operators often used during the scenarios: the NORS process formats, the large screen overview, the trends and the alarm system.

For an easier interpretation of the results, it should be noted that the alarms consist of 5 AOIs (four AOIs of the alarm list and the AOI of the alarm tile) and 2 screens, the NORS process formats of 4 AOIs and 4 screens, the large screen overview display of 10 AOIs, and the trends of 4 AOIs (two AOIs of the trends at the overview level and the two AOIs of the selected trends by the operators) and 1 screen for the overview trends and up to 4 screens of the selected trends. It is important to mention that all the visual accesses have been counted at consider 30 AOIs of the HSI (see Table 9-4). The frequency and duration data looking at the AOIs were calculated for each operator individually, and the statistics then derived as averages over those estimates.

The visual activity in these four information sources explained the 85.82% of the crews' visual accesses in the selected periods of the scenarios (in scenario 1: 87.09%, in scenario 2: 85.55%, and in scenario 3: 84.82%). The average number of visual accesses of the crews was the 25.99% of alarms, 22.16% in the NORS process formats, 19% in the large screen overview, and 18.66% in the trends. The data distribution of the reactor operators and the turbine operators are in Figures 10-17 and 10-18, respectively.

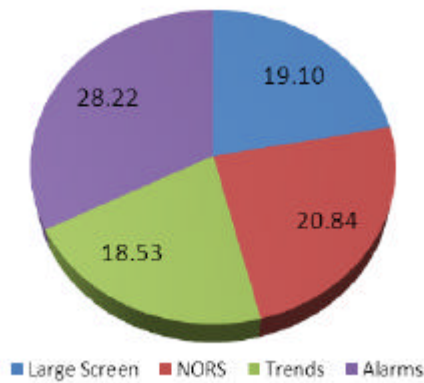


Figure 10-17. Average number of visual accesses of reactor operators in four information sources.

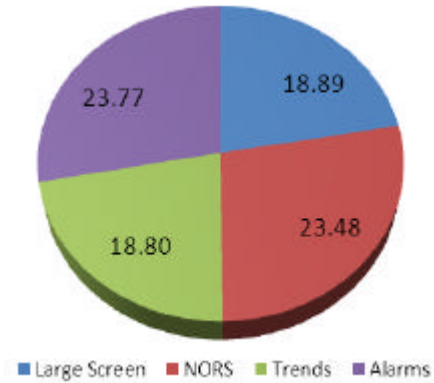


Figure 10-18. Average number of visual accesses of turbine operators in four information sources.

The visual activity in these four information sources explained the 90.84% of the time spent by the crews in the selected periods of the scenarios (in scenario 1: 91.03%, in scenario 2: 90.19%, and in scenario 3: 91.29%). The average proportion of time spent by the crews was the 47.80% in the NORS process format, 19.74% of the large screen overview, 12.23% of the trends, and 11.06% of alarms. Figures 10-19 and 10-20 show the average of the number of visual accesses in the twelve AOIs of the HSI of the reactors operators and the turbine operators, respectively.

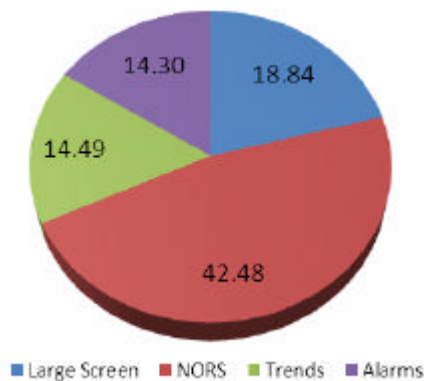


Figure 10-19. Average proportion of time of reactor operators in four information sources.

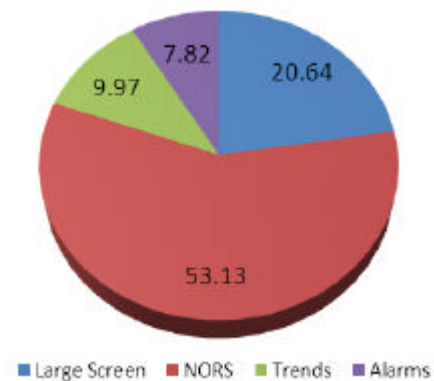


Figure 10-20. Average proportion of time of turbine operators in four information sources.

In Figures 10-19 and 10-20 can be observed that the turbine operators spent a larger proportion of time in the process formats and in the large screen overview display than the reactor operators.

When scoring the eye movement tracking data, it was noted that the large screen overview was often used as a communication tool in the control room between the members of the shift.

Also, it should be noted the relevance of the trends, for this reason four AOIs related with the trends were analyzed. Two of them deal with the curve trend itself and the other two with the current value of the parameter showing the actual register of the trend. The trends of the overview value reproduce the trends of the reference plant given as are a key information source for the operating crews in the plant.

The crews made a higher number of visual accesses to the trend curve than to the trend value (8.86% versus 8.64%); on the contrary, the crews spent a longer time in the trend value than in the trend curve (6.65% versus 5.38%). Further, the operators did not select many trends during the disturbances, approximately, 3 trends is the mean of the crews in all scenarios.

In the following, we will focus on the duration data. The proportion of operators' visual activity spent in the displays along each scenario is presented from Figure 10-21 to Figure 10-26. The horizontal axis indicates the time of occurrence, in one-minute periods throughout the scenario. The vertical axis presents the duration data of the four AOIs.

Figures 10-21 and 10-22 present the proportion of visual activity distribution along the scenario 1 of reactor operators and turbine operators, respectively. The information sources cover 90.51% of time spent by the reactor operators, and 91.54% of the turbine operators.

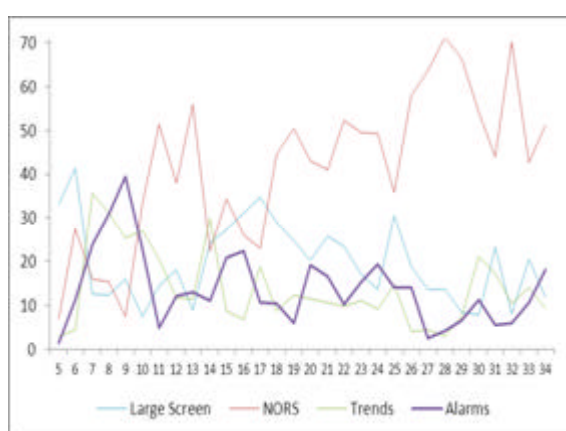


Figure 10-21. Proportion of visual activity of reactor operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 1.

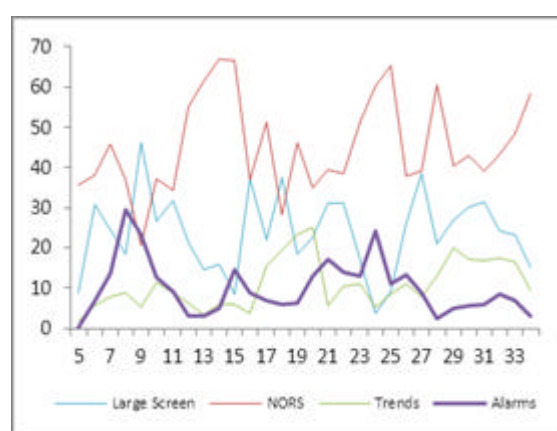


Figure 10-22. Proportion of visual activity of turbine operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 1.

Figures 10-23 and 10-24 present the proportion of visual activity distribution along the scenario 2 of the reactor operators and the turbine operators, respectively. The information sources cover 87.70% of time spent by the reactor operators, and 92.69% of the turbine operators.

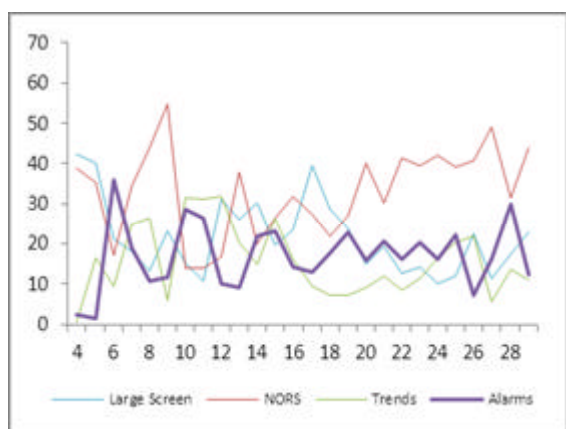


Figure 10-23. Proportion of visual activity of reactor operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 2.

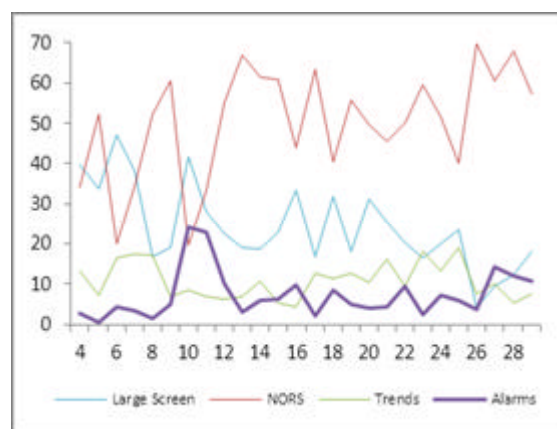


Figure 10-24. Proportion of visual activity of turbine operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 2.

Figures 10-25 and 10-26 present the proportion of visual activity distribution along the scenario 3 of the reactor operators and the turbine operators, respectively. The information sources cover 92.14% of time spent by the reactor operators, and 90.45% of the turbine operators.

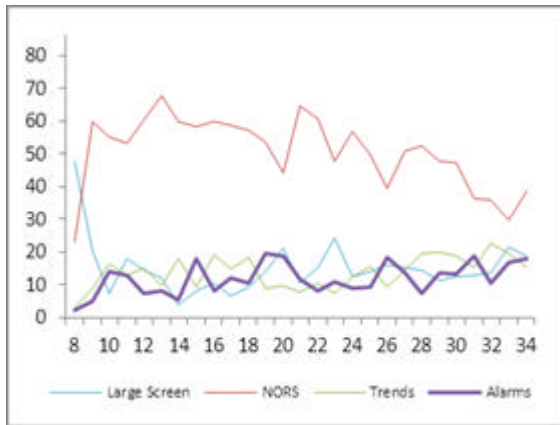


Figure 10-25. Proportion of visual activity of reactor operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 3.

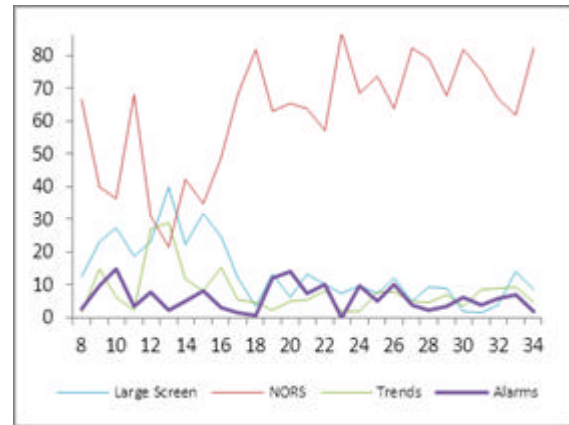


Figure 10-26. Proportion of visual activity of turbine operators in large screen, process formats, trends and alarms in scenario 3.

10.1.4 Descriptive statistics of actions in human-system interface

The crews interact with the process through the interface of the control room simulator. In this section, two types of actions are included. First, operator actions on the process in relation to the selection of the NORS process formats and the trends which are placed at the lower row of the HSI of the operators' workstations, and second, the alarm handling actions performed by the crews.

In general, it was noted that the operators hardly navigate in the HSI to look for additional information of the one provided automatically by the simulator.

10.1.4.1 Descriptive statistics of selection of process formats and trends

The descriptive statistics related to the selection of process formats in every scenario are included in Table 10-13. The reactor operators selected less process formats than the turbine operators in all scenarios. Approximately 15 NORS process formats were chosen by the reactor operators in every scenario. A higher variability in the amount of selected displays is found in the turbine operators. Appendix D provides additional information on the interaction with the process of every crew in all three scenarios.

Table 10-13. Selection of Process Formats in Three Scenarios

Scenario	Operator	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Crew	8.00	40.00	23.75	24.50	10.17	0.06
	RO	8.00	23.00	15.17	15.00	4.92	0.27
	TO	26.00	40.00	32.33	32.00	5.16	0.35
Scenario 2	Crew	8.00	39.00	21.33	20.00	9.06	0.35
	RO	8.00	23.00	15.00	16.00	5.40	0.11
	TO	16.00	39.00	27.67	28.50	7.42	-0.11
Scenario 3	Crew	11.00	54.00	24.75	25.50	14.11	0.87
	RO	11.00	31.00	15.00	11.00	8.00	2.25
	TO	25.00	54.00	34.50	28.50	12.08	1.12

The total amount of different NORS process formats which were chosen is presented in Table 10-14. Data are presented for each individual scenario and across scenarios. The selection corresponds with a total mean amount of process formats of 12.83 (reactor operators) and 25.67 (turbine operators). Again, the amount of process displays used by the turbine operators reached the highest values.

Table 10-14. *Selection of Different Process Formats in Scenarios*

Scenario	Operator	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Crew	7.00	20.00	12.67	13.00	5.05	0.24
	RO	7.00	13.00	8.50	8.00	2.26	2.19
	TO	13.00	20.00	16.83	18.00	3.06	-0.71
Scenario 2	Crew	6.00	18.00	11.58	10.00	3.78	0.55
	RO	6.00	10.00	9.00	10.00	1.67	-1.54
	TO	9.00	18.00	14.17	15.00	3.54	-0.57
Scenario 3	Crew	6.00	18.00	11.17	11.00	3.71	0.30
	RO	6.00	12.00	8.67	8.50	2.16	0.46
	TO	8.00	18.00	13.67	14.00	3.27	-0.85
All scenarios	Crew	11.00	32.00	19.25	18.50	7.28	0.32
	RO	11.00	16.00	12.83	12.50	1.94	0.84
	TO	21.00	32.00	25.67	25.00	3.72	0.85

Table 10-15 presents the main findings in relation to the selection of trends by the crews, reactor operators and turbine operators. The reactor operators chose a less number of trends than the turbine operators in all scenarios (i.e., 1.94 trends of the reactors operators versus 4 of the turbine operators). Appendix D provides additional information about the selected trend formats by the operators in all three scenarios.

Table 10-15. *Selection of Trends Formats in Three Scenarios*

Scenario	Operator	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Crew	0.00	7.00	3.25	3.50	2.60	0.08
	RO	0.00	6.00	1.50	1.00	2.26	2.19
	TO	3.00	7.00	5.00	5.00	1.55	0.00
Scenario 2	Crew	0.00	12.00	3.17	2.00	3.74	1.40
	RO	0.00	7.00	2.50	2.00	2.66	1.00
	TO	0.00	12.00	3.83	2.00	4.75	1.26
Scenario 3	Crew	0.00	7.00	2.50	2.00	2.02	1.07
	RO	0.00	4.00	1.83	1.50	1.47	0.42
	TO	1.00	7.00	3.17	2.50	2.40	0.88

Summarizing, the reactor operators of all crews selected a lower number of process formats and trends than the turbine operators in every scenario.

10.1.4.2 Descriptive statistics of alarm handling actions

Operators interact with CASH alarm system through the alarm treatment actions: acknowledgement (ACK), compress (COM) and silence (SIL). The operators' action of compressing, silence and acknowledgement in CASH system are described in 9.5.2.3.3. A summary is presented at the beginning of this sub-section for non-Spanish readers.

The operator acknowledgment' actions act simultaneously in the alarm list and in the alarm tile, i.e., there is only an acknowledge button for both screens of the alarm system. Output of acknowledging is that the blinking symbol (an asterisk) of the alarm message is darkened in the alarm

list, and as well, in the alarm tile, the frame around each tile stops blinking when the alarm is acknowledged. In all alarm screens, the alarms keep the color according with the alarm priority.

There are two alarm acknowledgement buttons. The operators may use the global button, which simultaneously acknowledge the alarms of all operators, and the primary or secondary button, based on the position in the team, which only acknowledge the alarms of the reactor operator or the turbine operator.

In connection with the compress action, the sequence of the deactivated alarms (alarms to off position) is: first, automatically changes the alarm color to white color, and second, disappears from the screen –i.e., eliminate or obscure the deactivated alarms– when the operator uses the compress button. This is, the deactivated alarms are kept in white color, in both the alarm list and the alarm tile, until they are compressed. The operators may use the global compress button, and the primary or secondary compress keyboard key.

In summary, the functioning of acknowledge, and compress primary/secondary alarms or all alarms (primary plus secondary) is as follows:

- Global acknowledgment actions and global compress actions give place to acknowledge and compress all the alarms of the alarm list and the alarm tile from both the primary and secondary side, i.e., the announced alarms to both operators.
- Primary acknowledgment and primary compress actions allow only acknowledging or compressing the alarms of primary side, from the reactor operator position.
- Secondary acknowledgment and secondary compress actions allow to only acknowledge or compressing alarms of secondary side, from the turbine operator position.

The silence action is used for ceasing the auditory signal associated with the occurrence of new alarms.

The descriptive statistics of the alarm treatment actions (acknowledge, compress and silence), at crew level, are presented in Table 10-16. The average mean scores of three scenarios are 37.14 (acknowledge), 54.58 (silence), and 55.56 (compress). The descriptive statistics at the operator level are presented later at exploring hypotheses on the alarm handling actions.

Table 10-16. *Descriptive Statistics of Alarm Handling Actions*

Scenario	Action	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	ACK	3.00	105.00	34.17	23.00	29.69	1.29
	COM	7.00	100.00	35.83	27.00	29.30	1.10
	SIL	7.00	88.00	37.50	33.00	24.79	0.60
Scenario 2	ACK	0.00	208.00	44.75	31.50	54.96	2.72
	COM	8.00	240.00	47.25	23.50	63.80	2.91
	SIL	7.00	373.00	59.42	36.00	100.00	3.31
Scenario 3	ACK	2.00	100.00	32.50	29.50	26.04	1.58
	COM	4.00	425.00	83.58	39.00	120.62	2.41
	SIL	18.00	192.00	66.83	35.50	65.24	1.23
Average of scenarios	ACK	11.67	120.33	37.14	32.67	29.91	2.12
	COM	10.33	181.00	55.56	34.33	56.21	1.47
	SIL	12.00	209.33	54.58	40.83	54.55	2.37

10.2 PEARSON CORRELATIONS BETWEEN FREQUENCY AND DURATION DATA FOR TOTAL SCENARIO TIME

With the scope of analyzing the relationship between the frequency and the duration data of the alarm AOIs during total scenario time, Pearson correlations have been calculated based on the means. The correlations are estimated with between and within designs for the three scenarios during the total scenario time. The results are calculated based on the crews and on the operator role.

10.2.1 Pearson correlations between frequency and duration data of each alarm area of interest

Pearson correlations between two variables, the frequency and duration data of the alarm AOIs, were calculated considering the total scenario time. Firstly, the Pearson correlations of between scenario designs are presented, and secondly, the correlation coefficients of within scenario designs of three scenarios are included.

10.2.1.1 Pearson correlations of frequency and duration data of alarm areas of interest across scenarios

Table 10-17 presents the correlations of the frequency and duration data of the alarm system AOIs across scenarios. All the correlation coefficients are highly statistically significant ($p < .001$); the range is from Pearson's $r(10) = .84$ to $r(10) = .97$.

Table 10-17. *Pearson Correlations between Frequency and Duration Data across Scenarios*

Area of Interest	Across Scenarios
Alarm System	.880 ^(***)
Alarm Tile	.863 ^(***)
Alarm List	.871 ^(***)
Alarm Tag of Alarm List	.838 ^(***)
Alarm Text of Alarm List	.945 ^(***)
Alarm Value of Alarm List	.971 ^(***)
Other Areas of Alarm List	.948 ^(***)
<i>Number of data</i>	<i>12</i>

Correlation (two-tailed) ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

Table 10-18 shows the correlation of the frequency and duration data of the alarm system AOIs across scenarios, separated by the position of the operators in the control room. Usually, the reactor operator's correlations are higher than the turbine operator's correlations; although in the alarm system and the alarm tile AOIs are not statistically significant effects. For the reactor operators, statistically significant findings are discovered in the alarm list and in its four AOIs. The turbine operators only have one statistically significant area: the alarm value.

Table 10-18. *Pearson Correlations between Frequency and Duration Data across Scenarios by Operator Role*

Area of Interest	Operator	Across Scenarios
Alarm System	Reactor Operator	.798
	Turbine Operator	.794
Alarm Tile	Reactor Operator	.658
	Turbine Operator	.699
Alarm List	Reactor Operator	.830 ^(*)
	Turbine Operator	.733
Alarm Tag of Alarm List	Reactor Operator	.978 ^(***)
	Turbine Operator	.625
Alarm Text of Alarm List	Reactor Operator	.969 ^(***)
	Turbine Operator	.755

Area of Interest	Operator	Across Scenarios
Alarm Value of Alarm List	Reactor Operator	.975 ^(***)
	Turbine Operator	.974 ^(***)
Other Areas of Alarm List	Reactor Operator	.871 ^(*)
	Turbine Operator	.750
Number of data		6

Correlation (2-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

10.2.1.2 Pearson correlations of frequency and duration data of alarm areas of interest in three scenarios

The results of the Pearson correlations of the frequency and duration data of the alarm system AOIs for each scenario, which are summarized in Table 10-19, are high or very high. In the scenario 1 the Pearson's correlation coefficients range from $r(10) = .96$, $p < .001$ to $r(10) = .71$, $p < .01$; in the scenario 2 from $r(10) = .96$ to $r(10) = .82$, and $p < .001$; and in the scenario 3 from $r(10) = .96$ to $r(10) = .86$, and $p < .001$.

Table 10-19. *Pearson Correlations between Frequency and Duration Data for Three Scenarios*

Area of Interest	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Alarm System	.889 ^(***)	.826 ^(***)	.873 ^(***)
Alarm Tile	.710 ^(**)	.857 ^(***)	.911 ^(***)
Alarm List	.912 ^(***)	.816 ^(***)	.858 ^(***)
Alarm Tag of Alarm List	.835 ^(***)	.884 ^(***)	.891 ^(***)
Alarm Text of Alarm List	.911 ^(***)	.943 ^(***)	.932 ^(***)
Alarm Value of Alarm List	.963 ^(***)	.956 ^(***)	.950 ^(***)
Other Areas of Alarm List	.777 ^(**)	.909 ^(***)	.964 ^(***)
Number of data	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

Table 10-20 presents the Pearson correlation of the frequency and duration data of the alarm system AOIs, considering the operator position. The correlation coefficients of the alarm AOIs in the scenario 1 range from $r(4) = .30$, non-significant to $r(4) = .99$, $p < .001$ for the reactor operators, and from $r(4) = .60$, non-significant to $r(4) = .94$, $p < .01$ for the turbine operators. In the scenario 2, the correlations of the reactor operators range from $r(4) = .35$, non-significant to $r(4) = .99$, $p < .001$, and of the turbine operators from $r(4) = .63$, non-significant to $r(4) = .96$, $p < .01$. In the scenario 3, the correlation coefficients of the reactors operators is from $r(4) = .73$, non-significant to $r(4) = .99$, $p < .001$ while the turbine operators go from $r(4) = .64$, non-significant to $r(4) = .99$, $p < .001$.

Table 10-20. *Pearson Correlations between Frequency and Duration Data by Operator Role for Three Scenarios*

Area of Interest	Operator	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Alarm System	Reactor Operator	.914 ^(**)	.350	.731
	Turbine Operator	.907 ^(*)	.634	.955 ^(**)
Alarm Tile	Reactor Operator	.298	.655	.808
	Turbine Operator	.686	.648	.974 ^(***)
Alarm List	Reactor Operator	.952 ^(**)	.428	.746
	Turbine Operator	.884 ^(*)	.704	.923 ^(**)
Alarm Tag of Alarm List	Reactor Operator	.991 ^(***)	.986 ^(***)	.987 ^(***)
	Turbine Operator	.604	.850 ^(*)	.644
Alarm Text of Alarm List	Reactor Operator	.981 ^(***)	.915 ^(**)	.924 ^(**)
	Turbine Operator	.827 ^(*)	.963 ^(**)	.892 ^(*)
Alarm Value of Alarm List	Reactor Operator	.981 ^(***)	.961 ^(**)	.927 ^(**)
	Turbine Operator	.938 ^(**)	.937 ^(**)	.996 ^(***)
Other Areas of Alarm List	Reactor Operator	.500	.848 ^(*)	.966 ^(**)
	Turbine Operator	.828 ^(*)	.774	.968 ^(***)
Number of data		6	6	6

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

10.2.1.3 Summary of results of Pearson correlations of frequency and duration of each alarm area of interest

The Pearson correlations between the duration and frequency data for the AOIs of the alarm system, the alarm tile and the alarm list are extracted from the previous tables. All the correlation coefficients are high in Table 10-21. Within scenarios, the highest Pearson correlations are reached in the alarm list (scenario 1) or the alarm tile (scenarios 2 and 3). Across scenarios, the highest correlation coefficients are in the alarm system, and the lowest correlations are found in the alarm tile. The statistical significance of the correlations diminishes when it is considered the operator position in within and between scenario designs.

Table 10-21. *Summary of Pearson Correlations between Frequency and Duration Data*

Scenario	Alarm AOI		
	Alarm System	Alarm List	Alarm Tile
Scenario 1	.889 ^(***)	.912 ^(***)	.710 ^(**)
Scenario 2	.826 ^(***)	.816 ^(***)	.857 ^(**)
Scenario 3	.873 ^(***)	.858 ^(***)	.911 ^(***)
Across Scenarios	.880 ^(***)	.871 ^(***)	.863 ^(***)

Correlation (two-tailed) is significant at ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

10.2.2 Pearson correlations of frequency and duration data between all alarm areas of interest

The Pearson correlations of the frequency or duration data of the alarm AOIs have been calculated based on the means for total scenario time. The Pearson correlations of the frequency or duration data of the alarm AOIs have been estimated across three scenarios (Tables 10-22 and 10-23), and within each scenario (Tables 10-26, 10-27, 10-28, 10-29, 10-30 and 10-31). The Pearson correlations take into account the operator position/role both across three scenarios (Tables 10-24 and 10-25), and within each scenario (Tables 10-32, 10-33, 10-34, 10-35, 10-36 and 10-37).

Firstly, the correlations of within scenario designs for the three scenarios are presented, and secondly, the correlation coefficients between three scenarios.

10.2.2.1 Pearson correlations of frequency and duration data between all alarm areas of interest across scenarios

Tables 10-22 and 10-23 show the Pearson correlations of the frequency and duration data of all alarm AOIs across the scenarios.

In the frequency data (see Table 10-22), a high Pearson correlation coefficient exist, with a $p < .01$, between the following alarm AOIs:

- the alarm system with the alarm tile, alarm list, and alarm text
- the alarm tile with the alarm list
- the alarm list with the alarm text, and the alarm value
- the alarm text and the alarm value.

Table 10-22. *Pearson Correlations between Frequency Data across Scenarios*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.942^(***)	.971^(***)	.378	.853^(***)	.684 ^(*)	.561
Alarm Tile		—	.835^(***)	.211	.640 ^(*)	.433	.687 ^(*)
Alarm List			—	.470	.944^(***)	.814^(***)	.433
Alarm Tag				—	.551	.581 ^(*)	.346
Alarm Text					—	.927^(***)	.209
Alarm Value						—	.124
Other Areas							—
Number of data	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

In the duration data (see Table 10-23), a high Pearson correlation coefficient exist, with a $p < .01$, between the following alarm AOIs:

- the alarm system and the alarm tile, alarm list, alarm text, and alarm value
- the alarm tile, and time and other parts of the alarm list
- the alarm list with the alarm text, and alarm value
- the alarm text and the alarm value.

Table 10-23. *Pearson Correlations between Duration Data across Scenarios*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.709^(**)	.956^(***)	.313	.893^(***)	.716 ^(**)	.468
Alarm Tile		—	.470	-.124	.459	.135	.772 ^(**)
Alarm List			—	.443	.926^(***)	.840^(***)	.264
Alarm Tag				—	.148	.276	-.109
Alarm Text					—	.808 ^(**)	.127
Alarm Value						—	.003
Other Areas							—
Number of data	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

The Pearson correlations of the frequency and duration data of the alarm AOIs, that take into account the operator position/role across three scenarios, are presented in Tables 10-24 and 10-25.

In the frequency data (Table 10-24), a moderate to high significant correlation coefficient exists, with a $p < .05$, between the following alarm AOIs:

- Reactor operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text; the alarm list with the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text; the alarm tile with the alarm list, and alarm text; the alarm list and the alarm text.

Table 10-24. *Pearson Correlations between Frequency Data across Scenarios by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	.869 ^(*)	.961 ^(**)	.003	.858 ^(*)	.707	-.339
	TO	—	.970^(***)	.985^(***)	.238	.979^(***)	.638	.708
Alarm Tile	RO		—	.699	-.425	.507	.275	-.107
	TO			—	.207	.915 ^(*)	.546	.778
Alarm List	RO			—	.240	.957 ^(**)	.868 ^(*)	-.429
	TO				.251	.988^(***)	.680	.634
Alarm Tag	RO				—	.488	.658	-.407

Area of Interest	Role	Area of Interest						Others
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	
Alarm Text	TO				–	.161	-.080	-.080
	RO					–	.966 ^(**)	-.518
	TO					–	.769	.707
Alarm Value	RO						–	-.579
	TO						–	.693
Other Areas	RO							–
	TO							–
<i>Number of data</i>		6	6	6	6	6	6	6
Correlation (two-tailed) is significant at		^(*) $p < .05$.		^(**) $p < .01$.		^(***) $p < .001$.		

In the duration data (Table 10-25), a moderate to high significant correlation coefficient exists, with a $p < .05$, between the following alarm AOIs:

- Reactor operators: the alarm system with the alarm list, alarm text, and alarm value; the alarm list with the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value; the alarm value, and time and other parts of the alarm list.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm list, and alarm text; the alarm tag, and time and other parts of the alarm list.

The negative values of the Pearson correlation coefficients between some AOIs in the duration data, such as in the alarm value and time and other parts of the alarm list ($r(4) = -.820$, $p < .05$) for the reactor operators, or between the alarm tag and time and other parts of the alarm list ($r(4) = -.951$, $p < .01$) for the turbine operators, may be explained by the human limitation in attention resources. If the operators spent a long time looking at a given AOI, less time will be available to check other relevant information in the interface.

Table 10-25. *Pearson Correlations between Duration Data across Scenarios by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						Others
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	
Alarm System	RO	–	-.054	.959 ^(***)	.291	.983^(***)	.904 ^(*)	-.790
	TO	–	.655	.873 ^(*)	-.410	.932 ^(**)	.374	.512
Alarm Tile	RO		–	-.335	-.784	-.020	-.467	.185
	TO		–	.202	-.584	.630	-.021	.747
Alarm List	RO			–	.498	.933 ^(**)	.985^(***)	-.798
	TO			–	-.153	.800	.498	.180
Alarm Tag	RO				–	.168	.623	-.565
	TO				–	-.649	-.605	-.951 ^(**)
Alarm Text	RO					–	.867 ^(*)	-.740
	TO					–	.496	.727
Alarm Value	RO						–	-.820 ^(*)
	TO						–	.380
Other Areas	RO							–
	TO							–
<i>Number of data</i>		6	6	6	6	6	6	6
Correlation (two-tailed) is significant at		^(*) $p < .05$.		^(**) $p < .01$.		^(***) $p < .001$.		

10.2.2.2 Pearson correlations of frequency and duration data between all alarm areas of interest within scenarios

Tables 10-26, 10-27, 10-28, 10-29, 10-30 and 10-31 show the Pearson correlations of the frequency and duration data of all the alarm AOIs for each scenario.

In the scenario 1, the frequency data reach a statistically significant correlation coefficient, with a $p < .01$, between the following alarm AOIs (Table 10-26): the alarm system with the alarm tile,

alarm list, alarm text, and alarm value; the alarm list and the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.

Table 10-26. *Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 1*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.820^(***)	.952^(***)	.232	.883^(***)	.739 ^(**)	.089
Alarm Tile		—	.604 ^(*)	.079	.470	.288	.297
Alarm List			—	.280	.976^(***)	.874^(***)	-.036
Alarm Tag				—	.321	.329	-.213
Alarm Text					—	.904^(***)	-.222
Alarm Value						—	-.081
Other Areas							—
Number of data	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

The duration data of scenario 1 present a statistically significant correlation coefficient, with a $p < .01$, between the AOIs (Table 10-27): the alarm system with the alarm list, and alarm text; the alarm tile, and time and other parts of the alarm list; the alarm list with the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.

Table 10-27. *Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 1*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.246	.945^(***)	.083	.922^(***)	.705 ^(*)	.330
Alarm Tile		—	-.085	-.271	-.033	-.378	.725 ^(**)
Alarm List			—	.176	.959^(***)	.852^(***)	.095
Alarm Tag				—	-.079	.239	-.352
Alarm Text					—	.758 ^(**)	.120
Alarm Value						—	-.161
Other Areas							—
Number of data	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

In the scenario 2, the frequency data present a statistically significant correlation coefficient, with a $p < .01$, between the following alarm AOIs (Table 10-28): the alarm system with the alarm tile, alarm list, and alarm text; the alarm tile with the alarm list; the alarm list with the alarm text; the alarm text and the alarm value.

Table 10-28. *Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 2*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.953^(***)	.980^(***)	.138	.782 ^(**)	.616 ^(*)	.661 ^(*)
Alarm Tile		—	.876^(***)	-.001	.594 ^(*)	.508	.695 ^(*)
Alarm List			—	.221	.866^(***)	.656 ^(*)	.606 ^(*)
Alarm Tag				—	.351	.030	.436
Alarm Text					—	.798^(***)	.307
Alarm Value						—	.105
Other Areas							—
Number of data	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

The duration data in the scenario 2 present a statistically significant correlation coefficient, with a $p < .01$, between the AOIs (Table 10-29): the alarm system with the alarm tile, alarm list, and alarm text; the alarm tile with the alarm list; the alarm list with the alarm text; the alarm text and the alarm value.

Table 10-29. *Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 2*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.849 ^(***)	.976 ^(***)	.269	.844 ^(***)	.678 ^(*)	.556
Alarm Tile		—	.714 ^(**)	-.090	.631 ^(*)	.659 ^(*)	.612 ^(*)
Alarm List			—	.394	.859 ^(***)	.626 ^(*)	.484
Alarm Tag				—	.050	-.325	.097
Alarm Text					—	.800 ^(**)	.106
Alarm Value						—	.137
Other Areas							—
<i>Number of data</i>	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

In the scenario 3, the frequency data present statistically significant correlation coefficients, with a $p < .01$, between the following alarm AOIs (see Table 10-30): the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm tag, and alarm text; the alarm tile with the alarm list, text, and time and other parts of the alarm list; the alarm list with the alarm tag, alarm text, and alarm value; the alarm tag and the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.

Table 10-30. *Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 3*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.970 ^(***)	.980 ^(***)	.727 ^(**)	.911 ^(***)	.680 ^(*)	.695 ^(*)
Alarm Tile		—	.903 ^(***)	.590 ^(*)	.794 ^(**)	.498	.764 ^(**)
Alarm List			—	.807 ^(***)	.967 ^(***)	.797 ^(**)	.608 ^(*)
Alarm Tag				—	.881 ^(**)	.920 ^(***)	.470
Alarm Text					—	.903 ^(***)	.534
Alarm Value						—	.354
Other Areas							—
<i>Number of data</i>	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

The duration data in scenario 3 present statistically significant correlation coefficients, with a $p < .01$, between the following AOIs (see Table 10-31): the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text, and alarm value; the alarm tile with the alarm list, alarm text, and time and other parts of the alarm list; the alarm list with the alarm tag, alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.

Table 10-31. *Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 3*

Area of Interest	Area of Interest						
	System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	—	.850 ^(***)	.977 ^(***)	.662 ^(*)	.956 ^(***)	.770 ^(**)	.601 ^(*)
Alarm Tile		—	.716 ^(**)	.287	.778 ^(**)	.363	.799 ^(**)
Alarm List			—	.759 ^(**)	.947 ^(***)	.871 ^(***)	.469
Alarm Tag				—	.586 ^(*)	.676 ^(*)	.065
Alarm Text					—	.763 ^(**)	.419
Alarm Value						—	.241
Other Areas							—
<i>Number of data</i>	12	12	12	12	12	12	12

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

Tables 10-32, 10-33, 10-34, 10-35, 10-36 and 10-37 show the Pearson correlations of the frequency and duration data of all alarm AOIs for every scenario based on the operator role.

In the scenario 1, the frequency data have a moderate to high significant correlation coefficient, with a $p < .05$, between the AOIs of (see Table 10-32):

- Reactor operators: the alarm system with the alarm list, alarm text, and alarm value; the alarm list with the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text; the alarm tile and the alarm list, and alarm text; the alarm list and the alarm text.

Table 10-32. *Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 1 by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	.734	.969 (***)	-.136	.940(**)	.853(*)	-.411
	TO	—	.920(**)	.976 (***)	.723	.983 (***)	.699	.057
Alarm Tile	RO	—	—	.543	-.514	.465	.331	-.174
	TO	—	—	.813(*)	.607	.853(*)	.438	-.232
Alarm List	RO	—	—	—	.019	.992 (***)	.934(**)	-.444
	TO	—	—	—	.738	.988 (***)	.795	.212
Alarm Tag	RO	—	—	—	—	.123	.292	-.604
	TO	—	—	—	—	.737	.406	-.140
Alarm Text	RO	—	—	—	—	—	.956(**)	-.519
	TO	—	—	—	—	—	.781	.098
Alarm Value	RO	—	—	—	—	—	—	-.490
	TO	—	—	—	—	—	—	.571
Other Areas	RO	—	—	—	—	—	—	—
	TO	—	—	—	—	—	—	—
Number of data		6	6	6	6	6	6	6
Correlation (two-tailed) is significant at			(*) $p < .05$.	(**) $p < .01$.	(***) $p < .001$.			

The duration data of the scenario 1 have a moderate to high significant correlation coefficient, with a $p < .05$, between the AOIs of (see Table 10-33):

- Reactor operators: the alarm system with the alarm list, the alarm text, and the alarm value; the alarm tile and the alarm value; the alarm list with the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm list, alarm text; the alarm list and the alarm text.

Table 10-33. *Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 1 by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	-.587	.988 (***)	.100	.984 (***)	.856(*)	-.136
	TO	—	.368	.927(**)	-.150	.956(**)	.610	-.117
Alarm Tile	RO	—	—	-.705	-.594	-.564	-.848(*)	.538
	TO	—	—	-.007	-.512	.506	-.382	-.139
Alarm List	RO	—	—	—	.201	.970 (***)	.912(*)	-.222
	TO	—	—	—	.042	.826(*)	.811	-.067
Alarm Tag	RO	—	—	—	—	-.037	.399	-.548
	TO	—	—	—	—	-.420	-.116	-.742
Alarm Text	RO	—	—	—	—	—	.823(*)	-.110
	TO	—	—	—	—	—	.553	.083
Alarm Value	RO	—	—	—	—	—	—	-.518
	TO	—	—	—	—	—	—	.347
Other Areas	RO	—	—	—	—	—	—	—
	TO	—	—	—	—	—	—	—
Number of data		6	6	6	6	6	6	6
Correlation (two-tailed) is significant at			(*) $p < .05$.	(**) $p < .01$.	(***) $p < .001$.			

In the scenario 2, the frequency data have a moderate to high significant correlation coefficient, with a $p < .05$, between the AOIs of (see Table 10-34):

- Reactor operators: the alarm system with the alarm tile, and alarm list; the alarm tile and the alarm tag; the alarm list and the alarm text; the alarm text and the alarm value; the alarm value, and time and other parts of alarm list.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text; the alarm tile and the alarm list; the alarm list and the alarm text; the alarm value and time and other parts of the alarm list.

Table 10-34. *Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 2 by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	.832 ^(*)	.945 ^(**)	-.569	.674	.678	-.587
	TO	—	.943 ^(**)	.968 ^(**)	.058	.917 ^(*)	.513	.554
Alarm Tile	RO	—	—	.605	-.866 ^(*)	.207	.358	-.352
	TO	—	—	.829 ^(*)	-.034	.795	.581	.544
Alarm List	RO	—	—	—	-.308	.845 ^(*)	.762	-.635
	TO	—	—	—	.123	.940 ^(**)	.423	.520
Alarm Tag	RO	—	—	—	—	.133	-.143	.031
	TO	—	—	—	—	.275	-.145	.407
Alarm Text	RO	—	—	—	—	—	.829 ^(*)	-.739
	TO	—	—	—	—	—	.622	.774
Alarm Value	RO	—	—	—	—	—	—	-.919 ^(**)
	TO	—	—	—	—	—	—	.818 ^(*)
Other Areas	RO	—	—	—	—	—	—	—
	TO	—	—	—	—	—	—	—
Number of data		6	6	6	6	6	6	6

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

In the scenario 2 (see Table 10-35), the duration data have a moderate to high significant correlation coefficient, with a $p < .05$, between the AOIs of:

- Reactor operators: the alarm system with the alarm list, alarm text, and alarm value; the alarm text with the alarm value, and time and other parts of alarm list.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, and alarm text; the alarm list and the alarm text; the alarm value, and time and other parts of the alarm list.

Table 10-35. *Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 2 by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	.436	.872 ^(*)	.017	.816 ^(*)	.883 ^(*)	-.720
	TO	—	.849 ^(*)	.979 ^(***)	.346	.937 ^(**)	.428	.642
Alarm Tile	RO	—	—	-.060	-.597	.188	.550	-.058
	TO	—	—	.724	-.014	.780	.586	.661
Alarm List	RO	—	—	—	.345	.802	.680	-.767
	TO	—	—	—	.457	.923 ^(**)	.333	.585
Alarm Tag	RO	—	—	—	—	-.216	-.381	.011
	TO	—	—	—	—	.184	-.645	-.312
Alarm Text	RO	—	—	—	—	—	.846 ^(*)	-.924 ^(**)
	TO	—	—	—	—	—	.476	.583
Alarm Value	RO	—	—	—	—	—	—	-.680
	TO	—	—	—	—	—	—	.885 ^(*)
Other Areas	RO	—	—	—	—	—	—	—
	TO	—	—	—	—	—	—	—
Number of data		6	6	6	6	6	6	6

Correlation (two-tailed) is significant at ^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$. ^(***) $p < .001$.

In the scenario 3 (see Table 10-36), the frequency data have a moderate to high significant correlation coefficient, with a $p < .05$, between the AOIs of:

- Reactor operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, and alarm text; the alarm tile and the alarm list; the alarm list and the alarm text; the alarm tag with the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text, alarm value, and time and other parts of the alarm list; the alarm tile with the alarm list, alarm text, and time and other parts of the alarm list; the alarm list with the alarm text, alarm value, and time and other parts of the alarm list; the alarm text and the alarm value.

Table 10-36. *Pearson Correlations between Frequency Data in Scenario 3 by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	.945 ^(**)	.968 ^(**)	.535	.865 ^(*)	.535	.294
	TO	—	.992^(***)	.997^(***)	.706	.957 ^(**)	.868 ^(*)	.869 ^(*)
Alarm Tile	RO	—	—	.832 ^(*)	.245	.667	.242	.443
	TO	—	—	.980^(***)	.652	.918 ^(**)	.811	.918 ^(**)
Alarm List	RO	—	—	—	.718	.953 ^(**)	.721	.157
	TO	—	—	—	.735	.973^(***)	.896 ^(*)	.833 ^(*)
Alarm Tag	RO	—	—	—	—	.871 ^(*)	.991^(***)	-.033
	TO	—	—	—	—	.762	.778	.437
Alarm Text	RO	—	—	—	—	—	.865 ^(*)	.133
	TO	—	—	—	—	—	.973^(***)	.721
Alarm Value	RO	—	—	—	—	—	—	-.045
	TO	—	—	—	—	—	—	.583
Other Areas	RO	—	—	—	—	—	—	—
	TO	—	—	—	—	—	—	—
Number of data		6	6	6	6	6	6	6
Correlation (two-tailed) is significant at			(*) $p < .05$.	(**) $p < .01$.	(***) $p < .001$.			

The duration data of the scenario 3 indicate (Table 10-37):

- Reactor operators: the alarm system and the alarm list, alarm text; the alarm list with the alarm tag, alarm text, and alarm value; the alarm tag and the alarm value.
- Turbine operators: the alarm system with the alarm tile, alarm list, alarm text, and alarm value; the alarm tile, and time and other parts of alarm list; the alarm list and the alarm text, and alarm value; the alarm text and the alarm value.

Table 10-37. *Pearson Correlations between Duration Data in Scenario 3 by Operator Role*

Area of Interest	Role	Area of Interest						
		System	Tile	List	Tag	Text	Value	Others
Alarm System	RO	—	.643	.961 ^(**)	.668	.969^(***)	.735	.279
	TO	—	.852 ^(*)	.987^(***)	.261	.865 ^(*)	.887 ^(*)	.556
Alarm Tile	RO	—	—	.406	-.123	.601	-.024	.663
	TO	—	—	.758	-.120	.743	.653	.858 ^(*)
Alarm List	RO	—	—	—	.842 ^(*)	.939 ^(**)	.885 ^(*)	.093
	TO	—	—	—	.362	.852 ^(*)	.906 ^(*)	.432
Alarm Tag	RO	—	—	—	—	.681	.930 ^(**)	-.321
	TO	—	—	—	—	-.073	.118	-.183
Alarm Text	RO	—	—	—	—	—	.698	.078
	TO	—	—	—	—	—	.832 ^(*)	.306
Alarm Value	RO	—	—	—	—	—	—	-.112
	TO	—	—	—	—	—	—	.357
Other Areas	RO	—	—	—	—	—	—	—
	TO	—	—	—	—	—	—	—
Number of data		6	6	6	6	6	6	6
Correlation (two-tailed) is significant at			(*) $p < .05$.	(**) $p < .01$.	(***) $p < .001$.			

10.2.2.3 Summary of results of Pearson correlations between all alarm areas of interest

In across scenario designs, the highest Pearson correlations ($p < .001$) in the frequency data correspond to the alarm system with the alarm tile, alarm list and alarm text; the alarm tile with the alarm list; the alarm list with the alarm text and alarm value; the alarm text with the alarm value. In the duration data, the alarm system with the alarm list and alarm text; the alarm list with the alarm text, and alarm value.

Considering the operator role, the frequency data of the turbine operators get high correlation coefficients between the alarm system and the alarm tile, alarm list, and alarm text; and the alarm list with the alarm text. The duration data of the reactor operators reach high correlation coefficients between the alarm system and the alarm text, and the alarm list with the alarm value.

The Pearson correlations of the frequency data of the first scenario obtain high scores between: the alarm system with the alarm tile, alarm list, and alarm text; the alarm list with the alarm text, and alarm value; and, the alarm text with the alarm value. The correlation coefficients of the duration data are higher between the alarm system with the alarm list, and alarm text; and, the alarm list with the alarm text, and alarm value.

In the scenario 1, the frequency data of the reactor operators score high between the alarm system and the alarm list; and, the alarm list with the alarm text. The turbine operators reached high correlation coefficients between the alarm system and the alarm list, and alarm text; and, the alarm list and the alarm text. The duration data of the reactor operators in the first scenario were high in correlation coefficients of the alarm system with the alarm list, and alarm text; and, the alarm list and the alarm text.

In the scenario 2, the Pearson correlations of the frequency data obtain high scores between the alarm system and the alarm tile, and alarm list; the alarm tile with the alarm list; the alarm list with the alarm text; and, the alarm text with the alarm value. The duration correlations are high between the alarm system and the alarm tile, alarm list, and alarm text; and, the alarm list and the alarm text.

By operator role, the duration data of the turbine operators correlate highest between the alarm system and the alarm list in the scenario 2.

In the scenario 3 the Pearson correlations of the frequency data obtain high scores between the alarm system and the alarm tile, alarm list, and alarm text; the alarm tile and the alarm list; the alarm list with the alarm tag, and alarm text; the alarm tag with the alarm value; and, the alarm text with the alarm value. The duration correlations are highest between the alarm system and the alarm tile, alarm list, and alarm text: and, the alarm list with the alarm text, and alarm value.

By the operator role in the third scenario, the frequency correlations of the reactor operators were highest between the alarm tag and the alarm value. The highly correlated data of the turbine operators were between the alarm system with the alarm tile, and alarm list; the alarm tile with the alarm list; the alarm list with the alarm text; the alarm text with the alarm value.

The correlation coefficients of the duration data of the reactor operators in the scenario 3 were highest between the alarm system and the alarm text; for the turbine operators, between the alarm system and the alarm list.

A summary of the results of the Person correlation coefficients is provided in Table 10-38.

Table 10-38. *Summary of Pearson Correlations between Frequency and Duration Data of Alarm AOIs*

Area of Interest	Role	Scenario	Area of Interest				Value
			Tile	List	Tag	Text	
Alarm System	Crew	Scenario 1	F	F / D		F / D	
		Scenario 2	F / D	F / D		D	
		Scenario 3	F / D	F / D		F / D	
	RO	Scenario 1		F / D		D	
		Scenario 3				D	
	TO	Scenario 1		F		F	
		Scenario 2		D			
		Scenario 3	F	F / D			
Alarm Tile	Crew	Scenario 2		F			
		Scenario 3		F			
	TO	Scenario 3		F			
Alarm List	Crew	Scenario 1				F / D	F / D
		Scenario 2				F / D	
		Scenario 3			F	F / D	D
	RO	Scenario 1				F / D	
	TO	Scenario 1				F	
		Scenario 3				F	
Alarm Tag	Crew	Scenario 3					F
	RO	Scenario 3					F
Alarm Text	Crew	Scenario 1					F
		Scenario 2					F
		Scenario 3					F
	TO	Scenario 3					F

Note. F stands for frequency data. D refers to duration data.

Finally, it can be observed that the correlations between the alarm tile and list are significant in the frequency data of the turbine operators. Across scenarios, at the crew level, the correlations of the alarm tile and list are also significant in the frequency data of the three scenarios, and in the duration data of the scenarios 2 and 3.

10.2.3 Summary of results of Pearson correlations

The correlation coefficients of the frequency and duration data of the alarm system AOIs across the scenarios are highly statistically significant (from .84 to .97). When considering the operator position, the correlation coefficients of the reactor operators are higher than the turbine operators, although there are not statistically significant effects in the AOIs of the alarm system and alarm tile.

The correlation coefficients calculated for each scenario are highly or very highly. The highest correlations of the AOIs of the alarm system and alarm list are in the scenario 1; the alarm tile score is highest in the scenario 3. When taking into account the operator role, the reactor operators reach highest correlation in: the alarm system and alarm list in the scenario 1, and the alarm tile in the scenario 3. For the turbine operators, the highest Pearson correlations for the three AOIs are in the scenario 3.

The highly statistically significant correlation coefficients between the alarm AOIs are found in all the scenarios. Some more are detected in the frequency data than in the duration data. When considering the operator role, the correlations diminished, especially in the scenario 2.

Worthwhile to point the correlation coefficients, at crew level, between the alarm system with the alarm list, alarm text, and alarm tile.

10.3 NORMALITY TESTS

The normality tests are used to determine whether the frequency and duration data of the alarm AOIs (i.e., the alarm system, alarm tile, alarm list and the four AOIs of the alarm list: alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of the alarm list) are modeled by a normal distribution, as, in the statistical hypothesis testing, those data will be tested against the null hypothesis that it is normally distributed.

The normality tests have been separately carried out for each scenario, and were considered the total time of the scenario, and the periods. The normality tests cover the crew data, and are also treated independently by the operator role.

The statistical normality tests of Kolmogorov-Smirnov with Lilliefors significance correction and Shapiro-Wilk are selected for testing the frequency and duration data of the alarm AOIs. Considering that data conform to the normality assumption if p -value $> .05$.

A summary of the results of the normality tests is included in this section. Appendix E presents exhaustive tables with all the normality test results.

10.3.1 Normality tests of the alarm areas of interest frequency data

The main results of the normality tests of the number of visual accesses to all alarm AOIs for the total time in the scenarios and for each scenario period are presented in the following.

10.3.1.1 Normality tests of frequency data in total scenario time

The frequency data conform to the normality assumption in the scenarios 2 and 3 ($p > .05$) with the normality tests of Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk by crew (except in one case), and by operator role. In the scenario 1, the AOIs of alarm system and alarm tile conform to the normality in both tests.

The results of the normality tests of the frequency data of the alarm AOIs for crews during the total scenario time are shown in Table 10-39. All data of the scenario 2 conform to the normality assumption in both Kolmogorov-Smirnov test and Shapiro-Wilk test; and also, in the scenario 3 all the alarm AOIs, except the alarm value (Shapiro-Wilk test). In the scenario 1, doesn't conform to the normality assumption the AOIs of alarm list and alarm text (with Shapiro-Wilk tests), and the alarm value (with Kolmogorov-Smirnov test).

Table 10-39. Normality Tests of Alarm Areas of Interest Frequency Data in All Scenarios

Scenario	Alarm AOI	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	p -value	Statistic	df	p -value
Scenario 1	Alarm System	.173	12	.200	.887	12	.107
	Alarm Tile	.193	12	.200	.917	12	.263
	Alarm List	.160	12	.200	.839	12	.027
	Alarm Tag (alarm list)	.223	12	.100	.919	12	.275
	Alarm Text (alarm list)	.213	12	.140	.860	12	.049

Scenario	Alarm AOI	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 2	Alarm Value (alarm list)	.251	12	.036	.861	12	.051
	Other parts (alarm list)	.175	12	.200	.948	12	.608
	Alarm System	.175	12	.200	.935	12	.437
	Alarm Tile	.141	12	.200	.949	12	.619
	Alarm List	.175	12	.200	.951	12	.648
	Alarm Tag (alarm list)	.196	12	.200	.869	12	.063
	Alarm Text (alarm list)	.204	12	.178	.931	12	.395
	Alarm Value (alarm list)	.179	12	.200	.969	12	.902
Scenario 3	Other parts (alarm list)	.183	12	.200	.912	12	.228
	Alarm System	.155	12	.200	.942	12	.525
	Alarm Tile	.171	12	.200	.911	12	.222
	Alarm List	.144	12	.200	.923	12	.315
	Alarm Tag (alarm list)	.173	12	.200	.892	12	.125
	Alarm Text (alarm list)	.162	12	.200	.918	12	.273
	Alarm Value (alarm list)	.233	12	.070	.845	12	.032
	Other parts (alarm list)	.147	12	.200	.933	12	.412

The results of the normality tests of the alarm AOIs for the frequency data of the total scenario time, based on the operator role, are presented in Table 10-40. All alarm data of the scenarios 2 and 3 conform to the normality assumption in both Kolmogorov-Smirnov test and Shapiro-Wilk test. In the scenario 1, the reactor operators data don't adjust to the normal distribution in the alarm list (Shapiro-Wilk test), alarm tag, and time and other parts of the alarm list (Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests).

Table 10-40. *Normality Tests of Alarm Areas of Interest Frequency Data Based on Operator Role in All Scenarios*

Scenario	Alarm AOI	Operator Role	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
			Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 1	Alarm System	RO	.243	6	.200	.849	6	.155
		TO	.287	6	.133	.851	6	.161
	Alarm Tile	RO	.275	6	.174	.885	6	.294
		TO	.274	6	.179	.904	6	.397
	Alarm List	RO	.280	6	.152	.764	6	.027
		TO	.237	6	.200	.896	6	.349
	Alarm Tag	RO	.363	6	.013	.762	6	.026
		TO	.150	6	.200	.976	6	.929
	Alarm Text	RO	.292	6	.121	.806	6	.067
		TO	.261	6	.200	.889	6	.312
	Alarm Value	RO	.307	6	.079	.819	6	.087
		TO	.291	6	.123	.840	6	.131
	Time and Others	RO	.351	6	.020	.791	6	.048
		TO	.166	6	.200	.959	6	.813
Scenario 2	Alarm System	RO	.201	6	.200	.891	6	.323
		TO	.100	6	.200	.996	6	.999
	Alarm Tile	RO	.132	6	.200	.985	6	.975
		TO	.199	6	.200	.918	6	.490
	Alarm List	RO	.165	6	.200	.950	6	.741
		TO	.180	6	.200	.946	6	.705
	Alarm Tag	RO	.198	6	.200	.955	6	.782
		TO	.238	6	.200	.893	6	.336
	Alarm Text	RO	.131	6	.200	.989	6	.987
		TO	.250	6	.200	.858	6	.184
	Alarm Value	RO	.141	6	.200	.982	6	.962
		TO	.217	6	.200	.898	6	.364
	Time and Others	RO	.238	6	.200	.897	6	.354
		TO	.206	6	.200	.944	6	.688

Scenario	Alarm AOI	Operator Role	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
			Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 3	Alarm System	RO	.153	6	.200	.970	6	.891
		TO	.214	6	.200	.904	6	.400
	Alarm Tile	RO	.169	6	.200	.924	6	.533
		TO	.217	6	.200	.872	6	.235
	Alarm List	RO	.210	6	.200	.956	6	.788
		TO	.200	6	.200	.921	6	.514
	Alarm Tag	RO	.208	6	.200	.943	6	.684
		TO	.251	6	.200	.854	6	.169
	Alarm Text	RO	.251	6	.200	.932	6	.593
		TO	.241	6	.200	.853	6	.166
	Alarm Value	RO	.254	6	.200	.916	6	.477
		TO	.251	6	.200	.811	6	.074
	Time and Others	RO	.253	6	.200	.864	6	.202
		TO	.298	6	.097	.852	6	.163

10.3.1.2 Normality tests of frequency data for the scenario periods

The results of the tests indicate that some few alarm AOIs conform to the normality in the periods of all three scenarios. However, when taking into account the operator role, the AOIs of the alarm system, alarm tile and alarm list conform in approximately half of the scenario periods to the normality. In Appendix E, the results of the normality test for the alarm AOIs during the periods of all three scenarios are presented.

10.3.2 Normality test of the alarm areas of interest duration data

The main results of the normality tests of the percentage of time gazing at the alarm AOIs, both for the total time in the scenarios and for each scenario period, are presented.

10.3.2.1 Normality tests of duration data in total scenario time

The duration data of the crews and operators conform to the normality assumption in the scenario 2 ($p > .05$) according to the normality tests of Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk. In the scenario 1, more amount of alarm AOIs conform to normality when considering the operator role. In the scenario 3, all the alarm AOIs, except the alarm tag and alarm value, adjust to the normality.

The results of the normality tests of the alarm AOIs, to the crew level, during the total scenario time are shown in Table 10-41. All alarm data of the scenario 2 conform to the normality assumption in both Kolmogorov-Smirnov test and Shapiro-Wilk test, and also, in the scenario 3, all AOIs, exception of the alarm value (Shapiro-Wilk test). In the scenario 1, doesn't conform to the normality assumption the AOIs of the alarm system, alarm list and alarm text (with Shapiro-Wilk tests), and the alarm value (with Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests).

Table 10-41. Normality Tests of Alarm Areas of Interest Duration Data in All Scenarios

Scenario	Alarm AOI	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 1	Alarm System	.239	12	.057	.828	12	.020
	Alarm Tile	.202	12	.191	.941	12	.511
	Alarm List	.201	12	.196	.803	12	.010
	Alarm Tag (alarm list)	.217	12	.124	.898	12	.148
	Alarm Text (alarm list)	.223	12	.103	.774	12	.005
	Alarm Value (alarm list)	.268	12	.017	.844	12	.031

Scenario	Alarm AOI	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 2	Other parts (alarm list)	.179	12	.200	.900	12	.159
	Alarm System	.125	12	.200	.979	12	.980
	Alarm Tile	.113	12	.200	.971	12	.924
	Alarm List	.142	12	.200	.944	12	.555
	Alarm Tag (alarm list)	.141	12	.200	.915	12	.248
	Alarm Text (alarm list)	.234	12	.069	.910	12	.211
	Alarm Value (alarm list)	.159	12	.200	.954	12	.699
Scenario 3	Other parts (alarm list)	.178	12	.200	.922	12	.305
	Alarm System	.194	12	.200	.916	12	.252
	Alarm Tile	.211	12	.146	.911	12	.222
	Alarm List	.180	12	.200	.931	12	.396
	Alarm Tag (alarm list)	.152	12	.200	.950	12	.644
	Alarm Text (alarm list)	.142	12	.200	.944	12	.552
	Alarm Value (alarm list)	.223	12	.103	.839	12	.027
	Other parts (alarm list)	.144	12	.200	.901	12	.165

The results of the normality tests of the alarm AOIs for duration data during the total scenario time, based on the operator role, are presented in Table 10-42. In general, the duration data conform to the normality assumption. All data of the scenario 2 conform to the normality in both Kolmogorov-Smirnov test and Shapiro-Wilk test. In the scenario 1, the reactor operators data don't adjust to the normal distribution in the alarm tag (Shapiro-Wilk test), and in the alarm value (Kolmogorov-Smirnov test). In the scenario 3, the turbine operator's data don't adjust to the normal distribution in the alarm value, and in time and other parts of the alarm list (Shapiro-Wilk test).

Table 10-42. *Normality Tests of Alarm Areas of Interest Duration Data Based on Operator Role in All Scenarios*

Scenario	Alarm AOI	Operator Role	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
			Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 1	Alarm System	RO	.238	6	.200	.868	6	.217
		TO	.246	6	.200	.888	6	.309
	Alarm Tile	RO	.200	6	.200	.926	6	.547
		TO	.191	6	.200	.940	6	.657
	Alarm List	RO	.226	6	.200	.858	6	.183
		TO	.208	6	.200	.905	6	.402
	Alarm Tag	RO	.423	6	.001	.686	6	.004
		TO	.225	6	.200	.929	6	.572
	Alarm Text	RO	.267	6	.200	.840	6	.129
		TO	.225	6	.200	.816	6	.081
	Alarm Value	RO	.325	6	.046	.828	6	.104
		TO	.265	6	.200	.845	6	.143
	Time and Others	RO	.235	6	.200	.842	6	.136
		TO	.233	6	.200	.886	6	.296
Scenario 2	Alarm System	RO	.173	6	.200	.985	6	.973
		TO	.206	6	.200	.917	6	.483
	Alarm Tile	RO	.171	6	.200	.968	6	.879
		TO	.250	6	.200	.900	6	.375
	Alarm List	RO	.282	6	.146	.857	6	.178
		TO	.272	6	.187	.917	6	.481
	Alarm Tag	RO	.269	6	.199	.908	6	.424
		TO	.233	6	.200	.830	6	.106
	Alarm Text	RO	.200	6	.200	.889	6	.312
		TO	.188	6	.200	.919	6	.495
	Alarm Value	RO	.155	6	.200	.974	6	.917
		TO	.221	6	.200	.953	6	.767
	Time and Others	RO	.169	6	.200	.939	6	.653
		TO	.220	6	.200	.885	6	.293

Scenario	Alarm AOI	Operator Role	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
			Statistic	df	p-value	Statistic	df	p-value
Scenario 3	Alarm System	RO	.264	6	.200	.902	6	.388
		TO	.234	6	.200	.942	6	.679
	Alarm Tile	RO	.201	6	.200	.886	6	.296
		TO	.157	6	.200	.965	6	.856
	Alarm List	RO	.195	6	.200	.951	6	.748
		TO	.249	6	.200	.899	6	.369
	Alarm Tag	RO	.251	6	.200	.907	6	.414
		TO	.259	6	.200	.897	6	.356
	Alarm Text	RO	.265	6	.200	.852	6	.164
		TO	.204	6	.200	.945	6	.703
	Alarm Value	RO	.177	6	.200	.920	6	.508
		TO	.276	6	.171	.764	6	.027
	Time and Others	RO	.244	6	.200	.893	6	.333
		TO	.239	6	.200	.774	6	.034

10.3.2.2 Normality tests of duration data for the scenario periods

The scenario periods of alarm AOIs (33 periods in scenario 1, 30 periods in scenario 2, and 31 periods in scenario 3) employed later in the ANOVA analyses are in one-minute periods throughout the scenario, with the exceptions that are explained as follows:

- In the scenario 1, the periods 1, 31, 32 and 33 lasted five minutes.
- In the scenario 2, the period 1 comprised four minutes, and the periods 28, 29 and 30 lasted five minutes.
- In the scenario 3, the periods 1 and 2 lasted four minutes, and the periods 30 and 31 lasted five minutes.

Most of the alarm duration data in the scenario periods, for both the crews and the operator position, don't conform to the normality assumption. Approximately half of the scenario periods for the AOIs of the alarm system, alarm tile and alarm list in the scenarios 1 and 2, being lower in the scenario 3.

The results of the tests for the crews indicate that some few scenario periods of the alarm AOIs conform to the normality in all three scenarios, presenting the best fit the alarm system, the alarm tile and the alarm list. Considering the operator position, some few scenario periods of the alarm AOIs conform to the normality in all three scenarios. The alarm system, alarm list and alarm tile adjust to a normal distribution of the duration data in approximately half of the periods in all three scenarios.

In Appendix E, the results of the normality test for the alarm AOIs during the periods of all three scenarios are presented.

10.3.3 Summary of results of normality tests

The frequency data of the alarm AOIs during the total scenario time, for the crew and the operator role, conform, except in one case, to the normality assumption in the scenarios 2 and 3. However, in the scenario 1, only some AOIs, such as the alarm system and alarm tile, adapt to the normality. Further, the frequency data don't conform to normality assumption in many scenario periods. When considering the operator role, some AOIs, such as the alarm system, the alarm tile and the alarm list, conform in approximately half of the scenario periods to the normality assumption.

In the scenario 2, the duration data of the alarm AOIs during the total scenario time, for the crew and the operator role, conform to the normality assumption. Also, in the scenario 3, all alarm AOIs, except the alarm tag and value, adjust to the normality. In the scenario 1, more alarm AOIs conform to normality when considering the operator role. Most of the alarm duration data, in the scenario periods, don't conform to the normality assumption. The alarm system, the alarm tile and the alarm list adjust to a normal data distribution in approximately half of the periods in all three scenarios.

10.4 SCENARIO RUN ORDER

The scenario run order was balanced with Latin Square technique in the experiment planning stage, but possible effects of the scenario run order are considered because the original balance was for four scenarios, while this study has covered three scenarios.

10.4.1 Hypothesis on scenario run order

There are expected no effects of the scenario run order in the study.

10.4.2 Data analyses of scenario run order

The scenario run order, the crews, and the interactions of the scenario run order by the crew were analyzed considering the duration and frequency data of the alarm system, the alarm tile and the alarm list. A variance component model, with random factors of scenario run order and crew, was employed. The Huyhn-Feldt correction was used to control the sphericity. The run order of the scenarios is in Table 10-43. The F values required for the statistical significations are show in Table 10-44.

Table 10-43. *Run Order of Three Scenarios*

Crew	Scenario		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Crew 1	3	1	2
Crew 2	2	1	3
Crew 3	1	3	2
Crew 4	2	3	1
Crew 5	2	1	3
Crew 6	1	3	2

Table 10-44. *F Values Required for the Significance and df*

	df	$p = .05$	$p = .01$
Crew	5	2.77	4.25
Scenario	2	3.55	6.01
Crew by scenario	10	2.41	3.51
Error	18		

The results of three scenarios are summarized in Tables 10-45 (frequency) and 10-46 (duration).

Table 10-45. *Run Order Effect, Crew Effect and Interaction Effect in Frequency Data in Three Scenarios*

Area of interest	Run order effect - F	Crew effect - F	Scenario by crew - F
Alarm tag	0.292	0.871	0.368
Alarm text	0.143	2.031	0.138
Alarm value	0.234	1.170	0.299
Other parts of alarm list	3.283	0.207	0.333
Alarm list	0.380	1.604	0.109
Alarm tile	0.300	1.255	0.139
Alarm system	0.348	1.325	0.110

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$.

There is not any significant effect of the scenario run order, crew effect and the interaction effect (scenario by crew) in the frequency data.

Table 10-46. *Run Order Effect, Crew Effect and Interaction Effect in Duration Data in Three Scenarios*

Area of interest	Run order effect - <i>F</i>	Crew effect - <i>F</i>	Scenario by crew - <i>F</i>
Alarm tag	1.667	0.170	0.276
Alarm text	0.540	1.664	0.322
Alarm value	0.164	1.183	0.406
Other parts of alarm list	3.562 ^(*)	0.586	0.557
Alarm list	0.536	1.174	0.298
Alarm tile	0.194	0.894	0.218
Alarm system	0.452	0.623	0.254

^(*) $p < .05$. ^(**) $p < .01$.

There is only a significant scenario run order effect in the AOI of time and other parts of the alarm list in the duration data. However, again there is not a crew effect or interaction effect in the duration data.

10.4.3 Summary of results of scenario run order

In conclusion, there is only one run order effect in the duration data: the AOI of time and other parts of the alarm list; without effects in the frequency data. The results clearly indicate the lack of a statistically significant effect in the alarm system as a whole and in alarm list and tile screens as well. This output supports the generalizability of results since the scenario order was not a relevant variable.

10.5 OPERATOR ROLE

Two operators of the team wore the eye tracking equipment, what allowed us to test the use of the alarm system by analyzing the operator position in the shift.

10.5.1 Hypothesis on operator role

There are not expected differences on the number of visual accesses and on the amount of time allocated to the alarm system, alarm list and alarm tile because of the operator role (reactor or turbine).

10.5.2 Data analyses on operator role

The Student *t*-test, analysis of variance (ANOVA)⁶³ repeated measures and non-parametric tests cover the data analysis for exploring whether the operator role has an influence on the use of the alarm system.

⁶³ There is not a non-parametric alternative test for complex designs. As Kirk (1995, p. 99) points out “the *F* statistic is quite robust with respect to violation of the normality assumption”. Maxwell and Delaney (2000, p. 112) summarize findings concerning the robustness of ANOVA: “ANOVA is generally robust to violations of the normality assumption, in that even when data are nonnormal, the actual Type I error rate is usually close to the nominal value . . . Thus, many researchers do not regard lack of normality as a serious impediment to the use of ANOVA . . . Most studies of robustness have focused on Type I error instead of Type II error (or power). The evidence that is available suggests that ANOVA is also generally robust in terms of power to violations of normality”. With a larger *n*, an alternative could be bootstrapping test.

10.5.2.1 Data analyses with Student t-test

The effects of the operator role on the percentage of time gazing at the AOIs of the alarm system (duration data), and the number of visual accesses per time unit at the AOIs of the alarm system (frequency data) have been explored in every scenario during the total scenario time. Comparisons with the Student t-test, repeated measures, for related samples for each AOI, were applied. The Levene test was utilized for equality of variances ($p < .05$).

The results are described, in first place, for the alarm system; secondly, the alarm list versus alarm tile. Finally, the alarm message content of the alarm list and the alarm tile were explored. The frequency data are initially presented.

10.5.2.1.1 Analysis of frequency data with Student t-test

10.5.2.1.1.1 Number of visual accesses to the alarm system

The results of the frequency data of the alarm system in three scenarios, with the Student t-test, are in Table 10-47. Statistically significant differences in the number of visual accesses to the alarm system are found in the scenarios 2 and 3, since the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system than the turbine operators.

Table 10-47. Student t-test for Frequency Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm System

Frequency of Alarm AOI	Scenario	Operator	Mean	Standard deviation	t (df=10)	p -value
Alarm System	Scenario 1	RO	5.98	2.68	1.369	.201
		TO	4.13	1.93		
	Scenario 2	RO	8.54	2.17	4.504	.001 ^(***)
		TO	3.81	1.37		
	Scenario 3	RO	7.38	3.36	2.393	.038 ^(*)
		TO	3.53	2.05		

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$. (***) $p < .001$. (+) $p < .10$.

10.5.2.1.1.2 Number of visual accesses to alarm list and to alarm tile

Table 10-48 summarizes the results of the Student t-test for the frequency data of the alarm list and alarm tile in three scenarios.

Table 10-48. Student t-test for Frequency Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm List and Tile

Frequency of Alarm AOI	Scenario	Operator	Mean	Standard deviation	t (df=10)	p -value
Alarm List	Scenario 1	RO	3.41	2.17	0.671	.518
		TO	2.72	1.30		
	Scenario 2	RO	5.16	1.52	4.035	.002 ^(**)
		TO	2.32	0.82		
	Scenario 3	RO	4.15	1.98	2.008	.072 ⁽⁺⁾
		TO	2.22	1.27		
Alarm Tile	Scenario 1	RO	2.56	0.79	2.650	.024 ^(*)
		TO	1.41	0.72		
	Scenario 2	RO	3.38	0.89	4.264	.002 ^(**)
		TO	1.49	0.62		
	Scenario 3	RO	3.23	1.52	2.730	.021 ^(*)
		TO	1.31	0.79		

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$. (***) $p < .001$. (+) $p < .10$.

A statistically significant difference in the alarm list is found in the scenario 2, and there is also a tendency in the scenario 3. There are statistically significant differences in the alarm tile in all scenarios. All significant differences are due to the number of visual accesses of the reactor operators to the alarm list and the tile.

10.5.2.1.1.3 Number of visual accesses to four areas of interest of alarm list and to alarm tile

In the analysis, five AOIs of the alarm system are considered: four AOIs of the alarm list (alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of alarm list), and the alarm tile. The results of the Student t-test are presented in Table 10-49.

Table 10-49. Student t-test for Frequency Data of Reactor and Turbine Operators on 5 Alarm AOIs

Frequency of Alarm AOI	Scenario	Operator	Mean	Standard deviation	t (df=10)	p-value
Alarm tag of alarm list	Scenario 1	RO	1.57	0.73	0.506	.624
		TO	1.38	0.61		
	Scenario 2	RO	2.23	1.47	1.563	.149
		TO	1.22	0.57		
	Scenario 3	RO	2.50	1.25	2.321	.043 ^(*)
		TO	1.16	0.67		
Alarm text of alarm list	Scenario 1	RO	3.31	2.61	0.101	.921
		TO	3.19	1.52		
	Scenario 2	RO	4.51	2.07	1.970	.077 ⁽⁺⁾
		TO	2.70	0.88		
	Scenario 3	RO	4.14	2.36	1.725	.115
		TO	2.22	1.38		
Alarm value of alarm list	Scenario 1	RO	0.90	0.93	0.029	.977
		TO	0.88	0.63		
	Scenario 2	RO	1.28	0.76	1.128	.286
		TO	0.87	0.47		
	Scenario 3	RO	1.43	1.11	1.220	.250
		TO	0.80	0.64		
Time and other parts of alarm list	Scenario 1	RO	0.60	0.26	2.644	.025 ^(*)
		TO	0.24	0.21		
	Scenario 2	RO	1.94	0.50	6.458	.000 ^(***)
		TO	0.44	0.27		
	Scenario 3	RO	1.06	0.43	2.989	.014 ^(**)
		TO	0.38	0.36		
Alarm tile	Scenario 1	RO	2.56	0.79	2.650	.024 ^(*)
		TO	1.41	0.72		
	Scenario 2	RO	3.38	0.89	4.264	.002 ^(**)
		TO	1.49	0.62		
	Scenario 3	RO	3.23	1.52	2.730	.021 ^(*)
		TO	1.31	0.79		

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

There are statistically significant differences in some of the alarm AOIs. In all cases, the reactor operators make a higher number of visual accesses to the following alarm system AOIs than the turbine operators:

- Alarm tag of the alarm list, in the scenario 3.
- Alarm text of the alarm list, there is a tendency in the scenario 2.
- Time and other parts of the alarm list, in all three scenarios.
- Alarm tile, in all three scenarios.

10.5.2.1.2 Analyses of duration data with Student *t*-test

10.5.2.1.2.1 Percentage of time gazing at alarm system

The main results of the Student *t*-test of the alarm system duration data for the total time in three scenarios are presented in Table 10-50.

Table 10-50. Student *t*-test for Duration Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm System

Duration of alarm AOI	Scenario	Operator	Mean	Standard deviation	<i>t</i> (df=10)	<i>p</i> -value
Alarm System	Scenario 1	RO	11.57	3.98	2.160	.056 ⁽⁺⁾
		TO	7.84	1.44		
	Scenario 2	RO	14.54	2.16	4.830	.001 ^(***)
		TO	7.62	2.76		
	Scenario 3	RO	12.34	4.17	3.111	.011 ^(*)
		TO	6.16	2.51		

^(*)*p* < .05. ^(**)*p* < .01. ^(***)*p* < .001. ⁽⁺⁾*p* < .10.

There are statistically significant differences in the percentage of time gazing at the alarm system in two scenarios, and there is also a tendency in the scenario 1. All the significant differences are found in that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system than the turbine operators.

10.5.2.1.2.2 Percentage of time gazing at alarm list and tile

The duration data of the alarm list and the alarm tile have been explored for the total scenario time. Table 10-51 shows the main results of the Student *t*-test in the three scenarios.

Table 10-51. Student *t*-test for Duration Data of Reactor and Turbine Operators on Alarm List and Alarm Tile

Duration of Alarm AOI	Scenario	Operator	Mean	Standard deviation	<i>t</i> (df=10)	<i>p</i> -value
Alarm List	Scenario 1	RO	8.12	4.55	1.038	.324
		TO	6.11	1.34		
	Scenario 2	RO	10.87	1.94	4.261	.002 ^(**)
		TO	5.87	2.12		
	Scenario 3	RO	8.99	3.49	2.519	.030 ^(*)
		TO	4.84	2.02		
Alarm Tile	Scenario 1	RO	3.46	0.87	4.131	.002 ^(**)
		TO	1.73	0.54		
	Scenario 2	RO	3.67	1.06	3.515	.006 ^(**)
		TO	1.76	0.81		
	Scenario 3	RO	3.35	1.26	3.559	.005 ^(**)
		TO	1.32	0.61		

^(*)*p* < .05. ^(**)*p* < .01. ^(***)*p* < .001. ⁽⁺⁾*p* < .10.

There are statistically significant differences in the percentage of time gazing at the alarm tile in all the scenarios. Instead, the significant differences in the alarm list are found in the scenarios 2 and 3. The finding is that the reactor operators spent a longer time viewing the alarm list and tile than the turbine operators.

10.5.2.1.2.3 Percentage of time gazing at 4 areas of interest of alarm list and at alarm tile

The five AOIs of the alarm system are considered: four AOIs correspond to the alarm list (alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of alarm list), and one AOI is for the alarm tile. Table 10-52 shows the main results of the Student t-test for five AOIs in three scenarios.

Table 10-52. Student t-test for Duration Data of Reactor and Turbine Operators on 5 Alarm AOIs

Duration of Alarm AOI	Scenario	Operator	Mean	Standard deviation	<i>t</i> (df=10)	<i>p</i> -value
Alarm tag of alarm list	Scenario 1	RO	1.55	0.90	0.269	.794
		TO	1.43	0.73		
	Scenario 2	RO	1.92	1.39	0.660	.524
		TO	1.43	1.15		
	Scenario 3	RO	2.17	0.94	1.720	.116
		TO	1.30	0.81		
Alarm text of alarm list	Scenario 1	RO	4.98	3.77	0.791	.447
		TO	3.70	1.13		
	Scenario 2	RO	5.62	2.29	2.289	.045 ^(*)
		TO	3.18	1.26		
	Scenario 3	RO	4.53	1.95	2.296	.045 ^(*)
		TO	2.44	1.08		
Alarm value of alarm list	Scenario 1	RO	0.88	0.86	0.240	.815
		TO	0.78	0.48		
	Scenario 2	RO	1.16	0.62	1.522	.159
		TO	0.70	0.39		
	Scenario 3	RO	1.29	0.92	1.210	.254
		TO	0.72	0.67		
Time and other parts of alarm list	Scenario 1	RO	0.71	0.34	3.259	.009 ^(**)
		TO	0.19	0.19		
	Scenario 2	RO	2.18	1.03	3.452	.006 ^(**)
		TO	0.55	0.52		
	Scenario 3	RO	1.00	0.58	2.069	.065 ⁽⁺⁾
		TO	0.38	0.45		
Alarm tile	Scenario 1	RO	3.46	0.87	4.131	.002 ^(**)
		TO	1.73	0.54		
	Scenario 2	RO	3.67	1.06	3.515	.006 ^(**)
		TO	1.76	0.81		
	Scenario 3	RO	3.35	1.26	3.559	.005 ^(**)
		TO	1.32	0.61		

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

Statistically significant differences highlight that the reactor operators spent a larger percentage of time on the alarm AOIs. There are statistically significant differences between the operators related to the following alarm AOIs (see Table 10-52):

- Alarm text of the alarm list, in the scenarios 2 and 3.
- Time and other parts of the alarm list, in the scenarios 1 and 2, and a tendency in the scenario 3.
- Alarm tile, in all three scenarios.

10.5.2.1.3 Summary of results of frequency and duration data with Student t-test

A summary of main results of the number of visual accesses to the alarm system AOIs in all scenarios, with the Student t-test, is in Table 10-53. The reactor operators did a higher number of visual accesses to the alarm system, the displays of the alarm tile and the alarm list, and some AOIs of the alarm list than the turbine operators.

Table 10-53. *Summary of Results of Analysis of Frequency Data with Student t-test*

Frequency	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Alarm system	RO > TO ($p = .024$)	RO > TO ($p = .001$)	RO > TO ($p = .038$)
Alarm tile		RO > TO ($p = .002$)	RO > TO ($p = .021$)
Alarm list		RO > TO ($p = .002$)	RO > TO ($p = .072$)
Alarm tag	RO > TO ($p = .025$)	RO > TO ($p < .001$)	RO > TO ($p = .043$)
Alarm text			
Alarm value			
Time and others			RO > TO ($p = .014$)

A summary of the statistically significant results of the percentage of time to the alarm system AOIs in all scenarios, with the Student t-test, is presented in Table 10-54. The reactor operators spent more time in monitoring the alarm system, the alarm tile and the alarm list, and even some AOIs of the alarm list, than the turbine operators.

Table 10-54. *Summary of Results of Duration Data with Student t-test*

Duration	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Alarm system	RO > TO ($p = .056$)	RO > TO ($p = .001$)	RO > TO ($p = .011$)
Alarm tile	RO > TO ($p = .002$)	RO > TO ($p = .006$)	RO > TO ($p = .005$)
Alarm list		RO > TO ($p = .002$)	RO > TO ($p = .030$)
Alarm tag			
Alarm text		RO > TO ($p = .045$)	RO > TO ($p = .045$)
Alarm value			
Time and others	RO > TO ($p = .009$)	RO > TO ($p = .006$)	RO > TO ($p = .065$)

10.5.2.2 Data analyses with ANOVA

The ANOVA analysis has also explored the operator role effect for the total scenario time and the scenario periods. ANOVA tests the (null) hypothesis that the means of the operators on the AOIs are equal. The detailed results, including p -value, power and effect size, are presented later in the document.

The results of between scenario designs, for the total scenario time, indicate that the number of visual accesses of the reactor operators were higher than those of the turbine operators in the areas of the alarm system ($p = .018$), alarm tile ($p = .007$), alarm list ($p = .052$), alarm tag ($p = .079$), and time and other parts of the alarm list ($p < .001$). The reactor operators also spent a larger percentage of time viewing the AOIs of the alarm system ($p = .001$), alarm tile ($p = .001$), alarm list ($p = .014$), alarm text ($p = .092$), and time and other parts of the alarm list ($p = .001$) than the turbine operators.

The analyses with within scenario designs, for overall scenario time, also resulted in a higher number of visual accesses of the reactor operators to the alarm list and alarm tile in the scenarios 2 ($p = .001$) and 3 ($p = .038$). The reactor operators also spent a longer time on the alarm list and alarm tile in the scenario 1 ($p = .056$), scenario 2 ($p = .001$) and scenario 3 ($p = .011$) than the turbine operators as well.

The ANOVA repeated measures explored the number of visual accesses as well as the percentage of time spent on the alarm list versus alarm tile in all scenario periods (see 10.3.2.2 for a description of the scenario periods). The findings indicate that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system AOIs than the turbine operators:

- In 33 periods of the scenario 1, two statistically significant operator effects are found, and tendencies to an operator effect exist in 3 scenario periods (see Table 10-144).

- In 30 periods of the scenario 2, statistically significant operator effects exist in 11 periods, and tendencies to an operator effect are detected in 5 scenario periods (see Table 10-145).
- In 31 periods of the scenario 3, statistically significant operator effects are found in 7 periods, and tendencies to an operator effect happen in 3 scenario periods (see Table 10-146).

The reactor operators spent a larger time in monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators:

- Scenario 1: Statistically significant operator effects occur in 2 periods, while tendencies to an operator effect exist in 3 periods (see Table 10-159).
- Scenario 2: Statistically significant operator effects are in 6 periods, and tendencies to an operator effect exist in 4 scenario periods (see Table 10-160).
- Scenario 3: Statistically significant operator effects are in 5 periods, and tendencies to an operator effect happens in 5 periods too (see Table 10-161).

Moreover, all five alarm AOIs are considered. The results of the operator role, with the ANOVA analysis regarding the number of visual accesses and the percentage of time spend viewing the alarm list AOIs (i.e., the tag, text, value, and time and other parts) and the alarm tile AOI, on a period basis of each scenario, are summarized. In relation to the frequency data, in all cases, the reactor operators make higher number of visual accesses to the AOIs of the alarm system than the turbine operators:

- Scenario 1: One statistically significant operator effect happens in the periods (see Table 10-173).
- Scenario 2: Statistically significant operator effects occur in 10 periods. There is a tendency to an operator effect in 2 periods (see Table 10-174).
- Scenario 3: Statistically significant operator effects are found in 5 periods, and also a tendency to an operator effect occurs in 4 periods (see Table 10-175).

In addition, the results of duration data indicate that the reactor operators spent a larger percentage of time on the following AOIs of the alarm system than the turbine operators:

- Scenario 1: Statistically significant operator effects occur in 2 periods, and as well a tendency to an operator effect exists in 3 periods (see Table 10-188).
- Scenario 2: Statistically significant operator effects are in 6 periods. There is a tendency to an operator effect in 4 periods (see Table 10-189).
- Scenario 3: A statistically significant operator effect happens in 5 periods. There is a tendency to an operator effect in 5 periods (see Table 10-190).

10.5.2.3 Data analyses with non-parametric Mann-Whitney (MW) U test

The operator role has been analyzed with the non-parametric Mann-Whitney (MW) U test, by considering both data of the duration and frequency of the alarm system, the alarm tile, the alarm list, and the four AOIs of the alarm list for every scenario. The statistically significant effects ($p < .05$) of the operator role are shown in Table 10-55.

Table 10-55. *Descriptive Statistics and Contrasts of Operator Role with Mann-Whitney U test*

Scenario	Frequency or Duration	Area of Interest	Operator Role	Rank Mean	Mean	SD	U MW p-value
Scenario 1	Frequency	Time and other parts of list	RO	8.83	0.61	0.26	$p = .026$ RO > TO
			TO	4.17	0.24	0.21	
			Total		0.42	0.29	
		Alarm tile	RO	8.83	2.56	0.79	$p = .026$ RO > TO
			TO	4.17	1.41	0.72	
			Total		1.99	0.94	
	Duration	Time and other parts of list	RO	9.17	0.71	0.34	$p = .009$ RO > TO
			TO	3.83	0.19	0.19	
			Total		0.45	0.37	
		Alarm tile	RO	9.33	3.46	0.87	$p = .004$ RO > TO
			TO	3.67	1.73	0.54	
			Total		2.59	1.13	
Scenario 2	Frequency	Time and other parts of list	RO	9.50	1.94	0.50	$p = .002$ RO > TO
			TO	3.50	0.44	0.27	
			Total		1.19	0.87	
		Alarm list	RO	9.50	5.16	1.52	$p = .002$ RO > TO
			TO	3.50	2.32	0.82	
			Total		3.74	1.88	
		Alarm tile	RO	9.33	3.38	0.89	$p = .004$ RO > TO
			TO	3.67	1.49	0.62	
			Total		2.43	1.23	
		Alarm system	RO	9.42	8.54	2.17	$p = .002$ RO > TO
			TO	3.58	3.81	1.37	
			Total		6.17	3.02	
	Duration	Time and other parts of list	RO	9.17	2.18	1.03	$p = .009$ RO > TO
			TO	3.83	0.55	0.52	
			Total		1.36	1.15	
		Alarm list	RO	9.33	10.87	1.94	$p = .004$ RO > TO
			TO	3.67	5.87	2.12	
			Total		8.37	3.25	
		Alarm tile	RO	9.33	3.67	1.06	$p = .004$ RO > TO
			TO	3.67	1.76	0.81	
			Total		2.71	1.34	
		Alarm system	RO	9.50	14.54	2.16	$p = .002$ RO > TO
			TO	3.50	7.62	2.76	
			Total		11.08	4.32	
Scenario 3	Frequency	Time and other parts of list	RO	9.00	1.06	0.43	$p = .015$ RO > TO
			TO	4.00	0.38	0.36	
			Total		0.72	0.52	
		Alarm tile	RO	8.67	3.23	1.52	$p = .041$ RO > TO
			TO	4.33	1.31	0.79	
			Total		2.27	1.53	
		Alarm system	RO	8.75	7.38	3.36	$p = .026$ RO > TO
			TO	4.25	3.53	2.05	
			Total		5.45	3.33	
	Duration	Alarm tile	RO	9.17	3.35	1.26	$p = .009$ RO > TO
			TO	3.83	1.32	0.61	
			Total		2.34	1.42	
		Alarm system	RO	8.83	12.34	4.17	$p = .026$ RO > TO
			TO	4.17	6.16	2.51	
			Total		9.25	4.60	

A total of seventeen statistically significant effects of the operator role were obtained, which were distributed in: four effects in the scenario 1, eight effects in the scenario 2, and five effects in the scenario 3. Almost the same amount of effects was found in the data of frequency and duration. In the alarm list AOIs of the alarm tag, alarm text and alarm value were not statistically significant effects.

According to significance results, the turbine operators used the alarm AOIs a lower number of times, and during a shorter time, than the reactor operators.

10.5.2.3.1 Summary of results of non-parametric tests related to operator role

A summary table of the seventeen statistically significant effects attributed to the operator position in the crews is presented in Table 10-56.

Table 10-56. *Summary of the Operator Role Effects in Three Scenarios with Non-Parametric Tests*

Area of Interest	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
	Frequency	Duration	Frequency	Duration	Frequency	Duration
Alarm tag						
Alarm text						
Alarm value						
Time and other parts of list	$p = .026$	$p = .009$	$p = .002$	$p = .009$	$p = .015$	
Alarm list			$p = .002$	$p = .004$		
Alarm tile	$p = .026$	$p = .004$	$p = .004$	$p = .004$	$p = .041$	$p = .009$
Alarm system			$p = .002$	$p = .002$	$p = .026$	$p = .026$
N° of Effects	2	2	4	4	3	2

It may be possible to find some interaction effects of the operator role with other independent variables, but it has not been considered adequate introducing a more complex design because of the number of cases.

10.5.3 Summary of results on operator role

The results of the Student *t*-test, ANOVA within scenario designs, and Mann-Whitney tests indicate a higher frequency on the alarm system of the reactor operators in the scenarios 2 ($p = .001 / p = .002$) and 3 ($p = .038 / p = .026$). The reactor operators spent a larger percentage of time in alarm system in the scenario 1 ($p = .056$), scenario 2 ($p = .001 / p = .002$) and scenario 3 ($p = .011 / p = .026$) than turbine operators as well. Further, the frequency and duration data of the reactor operators on the alarm tile reached higher scores than the turbine operators in all scenarios. The scores of the reactor operators in the alarm list also were statistically significant in the scenario 2.

The AOIs of the alarm tag, the alarm text and the alarm value of the alarm list did not experience statistically significant effect referable to the operator position.

More amounts of statistically significant results –and tendency to an effect– in the operator role are found in the ANOVA results of two AOIs versus five AOIs along the scenario periods.

In all statistically significant results, the reactor operators gazed in more occasions, and for a larger time, to the alarm AOIs than the turbine operators.

10.6 HYPOTHESIS 1 ON PERCENTAGE OF TIME SPENT MONITORING THE ALARM SYSTEM AREAS OF INTEREST

10.6.1 Hypothesis on percentage of time

The first hypothesis of the study is related to the time that operators spend viewing the alarm system. The alarm system will be used around 10% of the available scenario time.

10.6.2 Data analyses of percentage of time

The descriptive statistics of the alarm duration data indicate that the mean time (average percentage) spent on the alarm system across three scenarios was 10.01%. The proportion of time is 9.70% (scenario 1), 11.08% (scenario 2), and 9.25 % (scenario 3) (see Table 10-57).

The results based on the operator role indicate that the reactor operators contribute with a longer time looking at the alarm system than the turbine operators (i.e., 12.82% versus 7.21%). The reactor operators spend (see Table 10-57): 11.57% (scenario 1), 14.54% (scenario 2), and 12.34% (scenario 3). In contrast, the turbine operators dedicate (see Table 10-57): 7.84% (scenario 1), 7.62% (scenario 2), and 6.16% (scenario 3).

Table 10-57. *Descriptive Statistics for Duration Data of Alarm System in Three Scenarios*

Duration of alarm system	Operator	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Crew	6.36	18.60	9.70	3.46	1.75
	Reactor operator	8.07	18.60	11.57	3.98	1.29
	Turbine operator	6.36	9.80	7.84	1.44	0.50
Scenario 2	Crew	2.80	17.81	11.08	4.32	-0.32
	Reactor operator	11.32	17.81	14.54	2.16	0.03
	Turbine operator	2.80	10.60	7.62	2.76	-1.15
Scenario 3	Crew	2.89	16.44	9.25	4.60	0.33
	Reactor operator	5.38	16.44	12.34	4.17	-1.04
	Turbine operator	2.89	10.30	6.16	2.51	0.70

A detailed analysis of the reactor operator's scores in each scenario highlights that, in 13 of 18 data cases (6 crews in 3 scenarios), the reactor operators use the alarm system longer than 10% of the available time. Specially, all the scores of reactor operators were above the 10% in the scenario 2. On the other hand, opposite results exist for the turbine operator's values, only in 2 of 18 scenario data, the percentage is above 10% of the overall time, but below the 11%.

Additionally, since high Pearson correlations exist between the data of duration and frequency, the descriptive analyses have been carried out for the frequency data in every scenario, see Table 10-58. The mean (average percentage) of the number of visual accesses to the alarm system in three scenarios is 5.54%, corresponding to 5.05% in the scenario 1, 6.17% in the scenario 2, and 5.45% during the scenario 3. The minimum is 1.26%, and the maximum 12.37%.

Table 10-58. *Descriptive Statistics for Frequency Data of Alarm System in Three Scenarios*

Frequency of alarm system ⁶⁴	Operator	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Crew	2.48	11.00	5.05	2.43	1.30
	Reactor operator	3.52	11.00	5.98	2.68	1.65
	Turbine operator	2.48	7.11	4.13	1.93	0.68
Scenario 2	Crew	1.93	10.89	6.17	3.02	0.35
	Reactor operator	5.78	10.89	8.54	2.17	-0.40
	Turbine operator	1.93	5.78	3.81	1.37	0.09
Scenario 3	Crew	1.26	12.37	5.45	3.33	0.78
	Reactor operator	3.33	12.37	7.38	3.36	0.33
	Turbine operator	1.26	6.41	3.53	2.05	0.60

⁶⁴ As explained earlier, frequency data for the alarm list AOIs were estimated by taking into account the sequentially of four alarm list AOIs.

The descriptive statistics considering the operator position in three scenarios indicate a mean number of visual accesses of the reactor operators to the alarm system of 7.27%, the alarm list of 4.24%, and the alarm tile is 3.06%. In contrast, the turbine operators reach a mean number of visual accesses to the alarm system of 3.82%, the alarm list of 2.42%, and the alarm tile of 1.41%.

10.6.3 Summary of results of percentage of time

The operators spent approximately the 10% of overall scenario time in monitoring the alarm system in an advanced control room simulator. However, it is highly relevant that alarm information is also 'embedded' in the rest of the HSI, e. g., in the large screen overview display and in the process formats. Most probably, this would increase, somehow, the percentage of time that operators spend in the monitoring, detecting, and perception the alarm information from the interface.

Further, even so, the descriptive statistics identify that the reactor operators seem to allocate a larger percentage of time at the alarm system than the turbine operators in all scenarios, i.e., 12.82% versus 7.21%. The hypothesis concerning the influence of the operator role on alarm system use was previously approached.

10.7 HYPOTHESES 2 AND 3 RELATED TO OPERATOR'S DETECTION TIME

The detection time is considered as the interval between the time the alarm was announced (this can be observed in the simulator logs and also in the alarm screens, if an alarm exists for the failure) and the time at which the operator detected the alarm in one of the information sources, including the alarm screens, the process formats and the large overview screen. The detection time of the operator is measured in seconds.

10.7.1 Predictions and hypotheses on detection time

The occurrence time of the disturbances and the operator's detection time have been analyzed for all transients of the three scenarios. The predictions and hypotheses regarding the detection time are related whether an alarm is implemented in the alarm system:

- The detection time of crew will be smaller if an alarm message directly indicates the disturbance.
- All crews will detect the malfunctions with an associated alarm message.

10.7.2 Data analyses of detection time

For the data analysis, the transients are split into two groups, based on the availability of an alarm message indicating the malfunction. The results are presented, in first place, for the transients with an associated alarm, and in second place, the transients without an alarm message indicating the failure.

10.7.2.1 Analysis of detection time with an associated alarm

A set of disturbances of the scenarios 1 and 2, in which the operators may employ, for detecting and diagnosing a transient, several information sources, such as the alarm system (alarm list and alarm tile) as well as other screens (i.e., the NORS process formats and the large screen overview

display), has been selected⁶⁵. This is named a transient with an associated alarm message (such as status of a component or system):

- Malfunction 1 (M1) - Trip of the FW pump RL22.
- Malfunction 2 (M2) - Reactor scram.
- Malfunction 3 (M3) - Turbines 10 and 50 trip.
- Malfunction 4 (M4) - Opening of the Steam Relief Valve (SRV) RA13.
- Malfunction 5 (M5) - Trip of the boron pump TB11.
- Malfunction 6 (M6) - Trap alarm in the leakage detection system.
- Malfunction 7 (M7) - Trip of the turbine 50.

The disturbances 1, 3, 4 and 7 are related to performance of the turbine operators, whereas reactor operators are responsible of detecting, diagnosing, and performing the corrective actions of the malfunctions 2, 5 and 6. A detailed analysis of the use of alarm system for detect and diagnose seven malfunctions with an associated alarm, in CASH alarm system, leads to the results that are explained below.

The detection time of the disturbances cover from a maximum of 90 seconds (M4 related to the opening of a SRV) to an immediate detection time, in 5 of 7 malfunctions, after annunciate an anomaly with an alarm (see Table 10-59).

Immediate detection times are found in the trip of a feedwater pump, reactor scram, turbine trips, and a trap alarm. A plausible explanation is that the operators in simulators are expecting something to happen. In addition to this, some transients were predictable. For example, at the beginning of the scenario 1, several operating crews mentioned to be expecting a trip of another feedwater pump, because the feedwater pump RL22D001 (–M1–) was in repair; and, this is a typical scenario of training in simulators.

Table 10-59. *Detection Time of Malfunctions*

Malfunction N°	Malfunction Identification	Scenario	Detection time		
			Maximum	Mean	SD
Malfunction 1	Trip of the FW pump RL22	Scenario 1	0.00	0.00	0.00
Malfunction 2	Reactor scram	Scenario 1	0.00	0.00	0.00
Malfunction 3	Turbines 10 and 50 trip	Scenario 1	0.00	0.00	0.00
Malfunction 4	Opening of the steam relief valve RA13	Scenario 1	90.00	32.83	33.70
Malfunction 5	Trip of the boron pump TB11	Scenario 1	21.00	4.17	8.40
Malfunction 6	Trap alarm in leakage detection system	Scenario 2	0.00	0.00	0.00
Malfunction 7	Trip of the turbine 50	Scenario 2	0.00	0.00	0.00

The detection times of seven transients are shown for each of the crews in Table 10-60. Two crews detected immediately all 7 malfunctions (100%), two crews in 6 of 7 disturbances (86%), and two crews in 5 of 7 abnormalities (71%). The detection time of the crew 1 (90 seconds) and of the crew 5 (38 seconds) was for only one transient (opening of the steam relief valve RA13). Beyond, the crews detect immediately after an alarm was announced in 36 of 42 possible situations (i.e., seven malfunctions and six crews).

⁶⁵ Torralba, Martínez-Arias, and Solá (2005) did a similar analysis, taking also into account a malfunction on the detection of a fire alarm, which has been excluded here as is considered that the alarm sound itself may further support the identification of the malfunction type.

Table 10-60. *Detection Time of Crews*

Crew	Detection time		SD
	Total	Mean	
Crew 1	90.00	12.86	34.02
Crew 2	45.00	6.43	11.01
Crew 3	49.00	7.00	16.82
Crew 4	0.00	0.00	0.00
Crew 5	38.00	5.43	14.36
Crew 6	0.00	0.00	0.00

10.7.2.2 Analysis of detection time in the absence of an alarm

The analysis is carried out in transients without an alarm indication, as it is common, in nuclear domain, find anomalies that have not been designed and implemented with an alarm message in the alarm system. Alarm system alerts, guides (directs), and informs the operators to abnormalities in the plant, and towards the required operator' actions. Therefore, alarm system should facilitate the detection of accidental situations. If the crews have to solve complex process situations based on several information sources, such as the process formats and the large screen, is expected an increase of the detection time.

Table 10-61 presents a summary of the minimum and maximum detection times of the selected disturbances in the scenarios 1 and 3. The operator's detection time should be taken with some caution since the minimum and maximum detection time have been estimated based on on-line protocols (comments) of process experts, simulator logs (implementation time of malfunctions and operators' actions), and eye movement tracking videotapes (i.e., objective data). However, no interviews carried out with crews.

Table 10-61. *Detection Time without an Alarm Indication*

Malfunction	Scenario	Detection Time	
		Minimum	Maximum
Leakage on primary side	Scenario 1	50 seconds	6 minutes 27 seconds
Spray valve YP11S001	Scenario 3	10 minutes 10 seconds	21 minutes 49 seconds
Valve YP11S003 in spray line	Scenario 3	0 minutes	11 minutes 40 seconds
Heater groups	Scenario 3	12 minutes 34 seconds	Not detected
Turbine bypass valve RC51S003	Scenario 3	1 minute 7 seconds	Not detected

The results point out to some few operating crews have an immediate detection time if an alarm is not implemented in the system. Specifically, two crews detected immediately, in the process formats, the opening of the spray valve YP11S003 in the scenario 3. Insomuch as the reactor operators were monitoring the NORS process format YP00, and the modification in valve position was clearly indicated by blinking and color change.

All crews had difficulties for detecting that the spray valve YP11S001, in the cooling down line for the pressurizer, was left open by mistake. It was implemented from the starting of the scenario as a human error in a former shift. It can be remarked that the reactor operators of all crews monitored around the area of the spray valve, in the NORS process format YP00, but did not detect the position of the valve. It is relevant to mention that the process format YP00 was selected at beginning of the scenario 3 by all crews, and the process format was kept available, by almost all the reactor operators, in one screen of the lower row along the scenario. Beyond, all reactor operators detected the opening of valve YP11S001 when the valve YP11S003 (in spray line for cooling down of pressurizer) also

opened. It could be argued that the two transients were related as both belong to the same system. Therefore, operators were guided to find the previous anomaly.

Figure 10-27 presents where to observe, in the process format YP00, the status position (open/close) of valves YP11S001 and YP11S003.

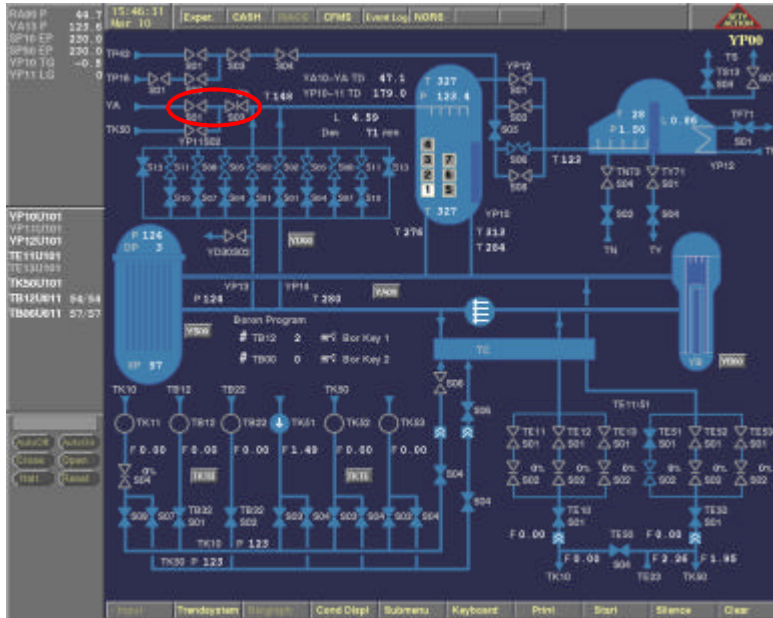


Figure 10-27. NORS format YP00: HSI of valves YP11S001 and YP11S003.

Further, the results also indicate that two transients were not detected by one of six crews: a crew didn't realize that the heater groups were disconnected, and another crew was not aware of the opening of the turbine bypass valve RC51S003 in the scenario 3. The turbine bypass valve RC51S003 is presented in the process formats SD50 and RC95, and also in the large screen overview display. Figures 10-28 and 10-29 indicate the position of the valve RC51S003.

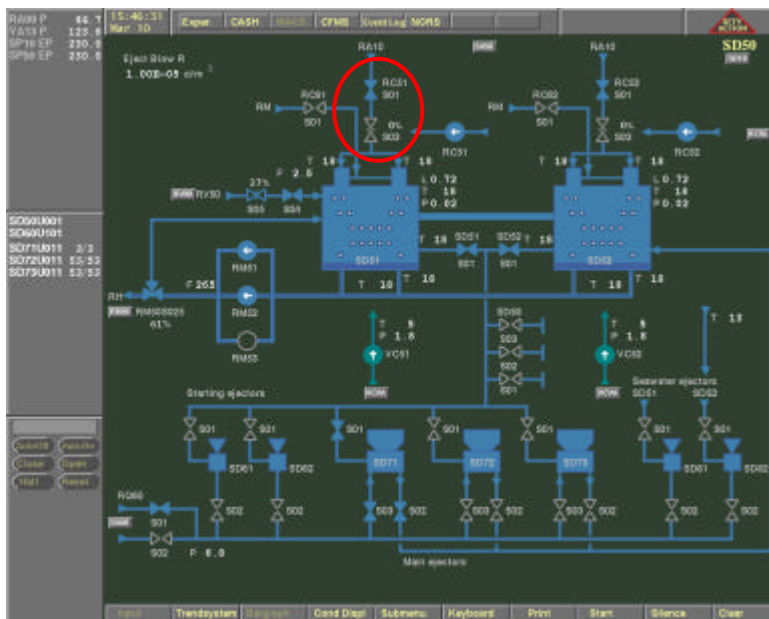


Figure 10-28. NORS format SD50: HSI of valves RC51S003 and RC51S001.

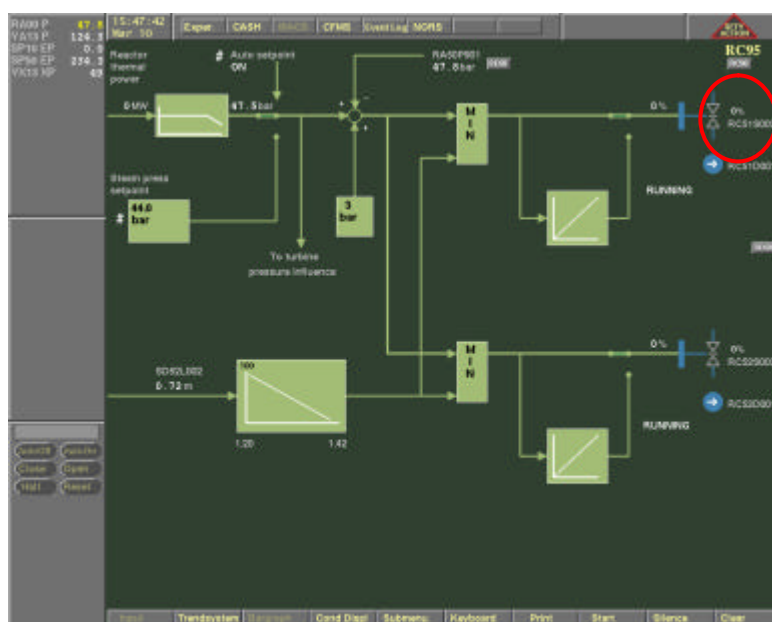


Figure 10-29. NORS format RC95: HSI of valve RC51S003.

In many transients with the absence of an alarm for the disturbance, some other alarms are related to the anomaly, and guide the operators towards the event. For example, in the scenario 1, the malfunction of a small leakage on the isolation valve YA13S001 in the primary loop 13 includes a highly relevant alarm related to the containment pressure (also alarms for the level in the pressurizer, and volume control system) for diagnosing the transient. Further, operators are trained to diagnosis by using the whole integrated HSI, including, for example, alarms, process state, or trends.

10.7.3 Summary of results on detection time

An immediate detection time happens in 5 of 7 disturbances for six crew when exist an alarm indicating the event. On the opposite, some few crews presented an immediate detection time if an alarm was not implemented in the system. These results corroborate our hypotheses on the detection time.

The crews detected and diagnosed all the transients in three scenarios, except two events. Beyond, some crews could not take all needed countermeasures within the available time in the scenario. This is, the team started to stabilize the process, and the boron program was initiated, but could not cooling down the plant (with the turbine bypass, and the pressurizer systems), being as some process conditions were not reached during the scenario (such as, the boron concentration level). See Appendix F for a brief description of the crew actions in every scenario.

10.8 HYPOTHESIS 4 ON THE INFORMATION SOURCE FOR THE DETECTION TASK

Operators may use the alarm displays (alarm tile versus alarm list) as well as other information sources, for example, the NORS process formats and the large screen overview display, for detecting the disturbances. The HSI element that the operators employ for detecting every malfunction is considered on the hypothesis and prediction.

The implementation time of the malfunction is included in the simulator logs. Therefore, initially the logs are reviewed, and it follows by observing in the video records of the eye tracking data at the information source which the operator glanced to detect the anomaly.

10.8.1 Hypothesis and research question on information source

A hypothesis related to the information source for detecting the disturbance is that the operators will mainly use the alarm list. However, the crews will employ all available information sources for detecting the events (the alarm list and tile, the process formats and the large screen overview). Not expected differences on using the alarm system versus other information sources because of the operator position in the team.

A research question is related to finding a systematic pattern of the operators for detecting some malfunctions in a specific screen of the interface.

10.8.2 Data analyses of information source

The data analysis for identifying the operators' information sources has been by reviewing the eye movement tracking, and then some descriptive statistics are estimated.

For detecting the disturbances, the number of times that each crew employs the alarm list, the alarm tile and other screens (i.e., the process formats and large screen) is shown in Figure 10-30. In six crews, the use of alarm list ranges from 86% to 43%, the alarm tile from 29% to 14%, the large screen overview display from 29% to 0%, and the process formats from 14% to 0%. This represents that the 75% of the operators gazed at the alarm list, 16.67% at the alarm tile, 5.56% at the NORS process formats, and 2.78% at the large screen.

Beyond, if the crews identified immediately what happened (i.e., zero detection time), the alarm list display was used more often for detecting the disturbances than the alarm tile and the other information sources (i.e., the NORS process formats and the large screen overview display).

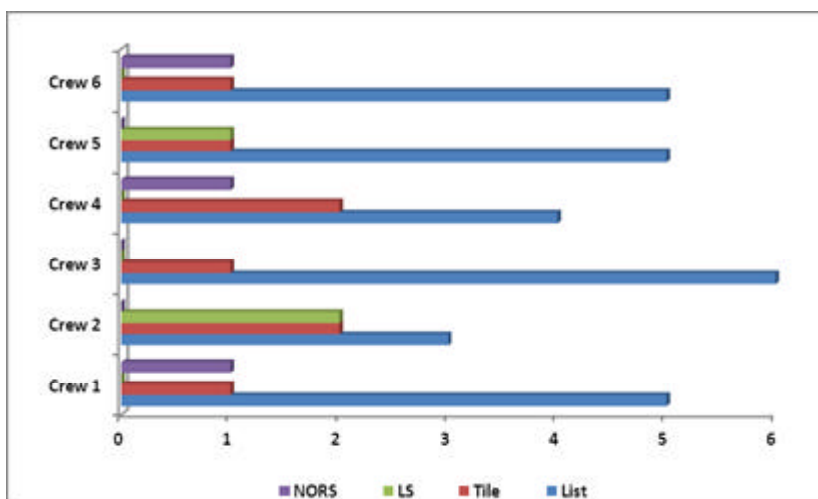


Figure 10-30. Transient detection: number of times that crews use alarm lists, alarm tiles, and other screens.

Looking into the operator position (see Figure 10-31), the results indicate that both operators exhibit a similar pattern in the use of the alarm system for detecting and diagnosing the process state, except in the malfunction 4 (opening of the steam relief valve RA13) of the turbine operators:

- The reactor operators always detected the trip of the boron pump TB11 in the alarm tile –M5–, the trap alarm in the leakage detection system in the alarm list –M6–, while five of six crews employed the alarm list for detecting the reactor scram –M2–.
- The turbine operators always detected the turbine 50 trip in the alarm list –M7–, and also the turbine 10 and 50 trips –M3– as well as the FW pump RL22 trip –M1– in the alarm list except a crew. However, the turbine operators allocated several information sources for the detection of the opening of the steam relief valve RA13 –M4–: the alarm list (one crew), the large screen (two crews) and the process format YB00 (three crews).

We also explored the research question if there were some differences in the use of alarm lists, alarm tiles and other screens by the disturbance type (Figure 10-31). In some of them, the operators only used the alarm list (i.e., the disturbances of trap alarm –M6– and turbine 50 trip –M7–) or the alarm tile (i.e., the trip of the boron pump TB11 –M5–). Further, in five of six crews, the operator's detections of the FW pump trip –M1–, the reactor scram –M2– and the turbine trip –M3– took place in the alarm list.

Beyond, in one disturbance, the operators hardly used the alarm system: the opening of the steam generator safety relief valve RA13 (–M4–). The crews, instead of the alarm system, attended to other sources of information, such as the process formats and the large screen overview. That event occurred a short time after the turbine trips, and presented the alarm message RA13S001B02 “STEAM RELIEF VALVE RA13: NOT CLOSED” in the alarm list of the turbine operators; the alarm was also presented in the alarm tile, in the NORS process formats and in the large screen overview. Two crews were following the procedures after the turbine trips, and detected the transient in the large screen overview display. Three crews employed the NORS process format YB00. Only one crew used the alarm list of the alarm system, and afterwards, checked the valve state in the large screen overview.

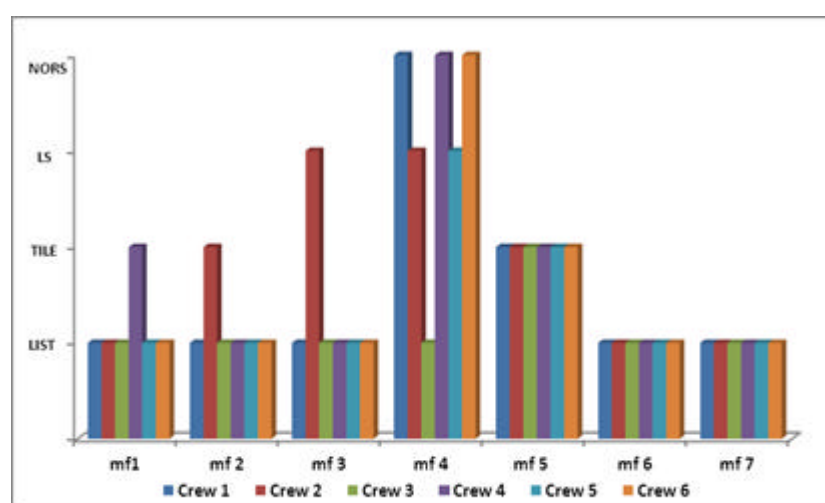


Figure 10-31. Use of alarm lists, alarm tiles, and other screens for detecting disturbances.

When the crews didn't attend to the alarm system displays, the operators choose either the process formats or the large screen overview display, i.e., the crews 1, 4 and 6 detect a transient in the

NORS process formats, while the crews 2 and 5 did use of the large screen overview. The crew 3 always used the alarm system, and in all transients except in one, the operators used the alarm list (see Figures 10-30 and 10-31).

10.8.3 Summary of results on information source

The result of the study is that the alarm list was the main information source employed by crews for detecting the disturbances.

Another main finding is that in many malfunctions with an associated alarm message, the operators determined the existence of an abnormality in the HSI with a relatively low variability between crews. However, the operators had preferences in selecting an alarm display in some transients as the main information source, i.e., in function of the disturbance type. For example, the trip of the high capacity boron pump TB11 was detected by all crews in the alarm tile (with the main advantage of fixed spatial dedication of the alarm for the pump TB11), and also the operators tend to look at the alarm tile when starting manually the boron program. On the other hand, the reactor scram and the turbine trips were usually detected in the alarm list.

It also seems that in some transients, the alarm system provides a kind of confirmatory role. For example, the operators did detect the disturbance in the large screen or in the process formats, and afterwards, searched for information at the alarm system screens. It was also observed that in occasions operators look for alarm information at both alarm displays (alarm tile and list) consecutively. This crew behavior seemed to relate with a double-checking of information. The crews verified the alarm information from a second information source to validate the existing information.

10.9 HYPOTHESIS 5 ON THE DIVERSE ROLES OF THE ALARM SYSTEM

The alarm system may be used with several purposes and for various functions, according to the literature review. A wide number of models on operator performance in high reliability organizations may be adopted. The functional criteria of Rankin et al. (1983, 1985): alert, inform, guide and confirmation as well. In here, we have chosen a general framework on operator performance in relation to the use of an alarm system, which is formed by the phases of the monitoring, detection, decision making and response execution.

10.9.1 Hypothesis on roles of alarm system

The hypothesis on the roles or functions of the alarm system is that the alarm system will primarily be used on the detection stage, which constitutes the primary function of the alarm system: alert (direct the attention) to the anomaly. However, the operators will also gaze at the alarm system during the phases of decision making and response execution (i.e., implementation of corrective actions), and to a much lesser extent to the initial stage of monitoring.

10.9.2 Data analysis of roles of alarm system

The data analysis is based on trend analyses of the time development (periods) of three scenarios, i.e., the different stages of the transients. Figures 10-32, 10-35 and 10-38 present the duration data of the alarm system in the scenarios 1, 2 and 3, respectively. In the scatter charts, the

horizontal axis indicates the time of occurrence: the start of every period, in one-minute periods throughout the scenario. The vertical axis presents the duration value on the alarm system. The alarm values of the reactor operators and the turbine operators are exhibited in Figures, as well as data aggregated at crew level (the mean score of both operators).

The trend analysis of the first scenario is presented in Figure 10-32. In scenario 1, the time spent in the alarm system by the crews, reactor operators and turbine operators is described in Figure 10-32. Four major anomalies of the scenario 1 were implemented in the first fifteen minutes: the trip of a feedwater pump, the reactor scram, the opening of a steam generator safety relief valve, and a small leakage in an isolation valve in the primary side. The trip of the high capacity boration pump was implemented about two minutes after the reactor operators started the boration; this disturbance was specific and implemented between the minutes 16 and 25, depending on operator's performance in the process. The reactor power was at 97.4% (full power). The automation level was extensive and the complexity was high.

It can be observed that the operators looked at the alarm system during all the scenario periods, except the first five minutes of the scenario 1. These first minutes correspond, partially, to the monitoring phase. The first alarm of the scenario is announced to the turbine operator afterwards of the implementation of the trip of a feedwater pump (at around minute 7). In the process, from about the minute 9, a reactor trip happened (unplanned automatic shutdown of the reactor), and therefore, the trip of the two turbines.

All crews detected the five malfunctions. At the last part of the scenario, some crews were preparing the system for cooling down the primary and the secondary side; some crews were already cooling down the process. Usually the actions were taken in the boron system, in relation to the malfunction of the trip of the high capacity boron pump and the set-up manually of the slight boron program.

In most periods, the reactor operators provide higher scores on alarm system than turbine operators.

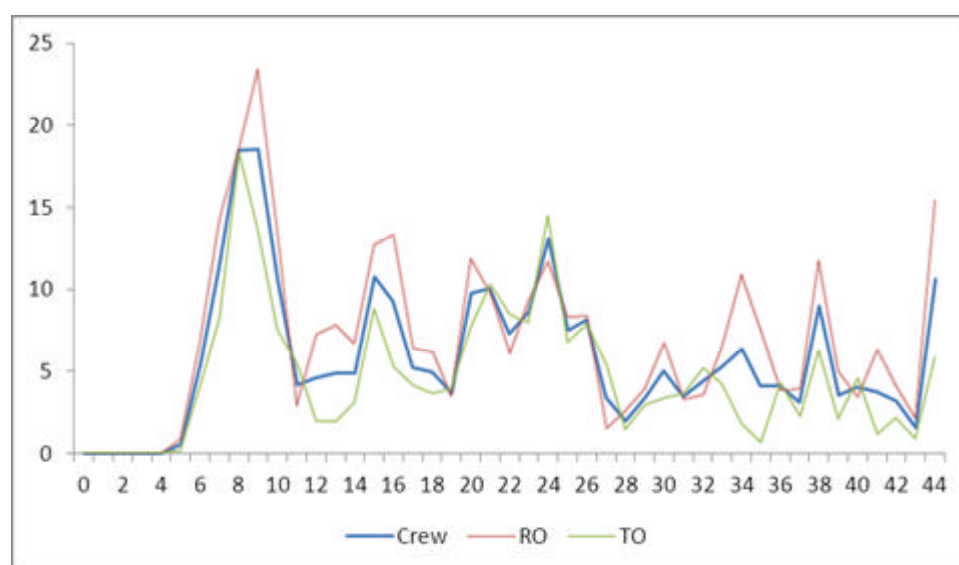


Figure 10-32. Distribution of Duration Data of Alarm System along Scenario 1.

To explore these results, the incoming alarms on every scenario period were considered. Figures 10-33 and 10-34 present the duration of the operators in the alarm system as well as the new incoming alarms and the maximum number of active alarms during the periods of the first scenario. The maximum number of alarms is estimated based on the activation of a new alarm during the specific period. However, in function of the alarm handling actions carried out by the crews, the number of existing alarms (i.e., active and deactivated alarms) in the screens may be larger.

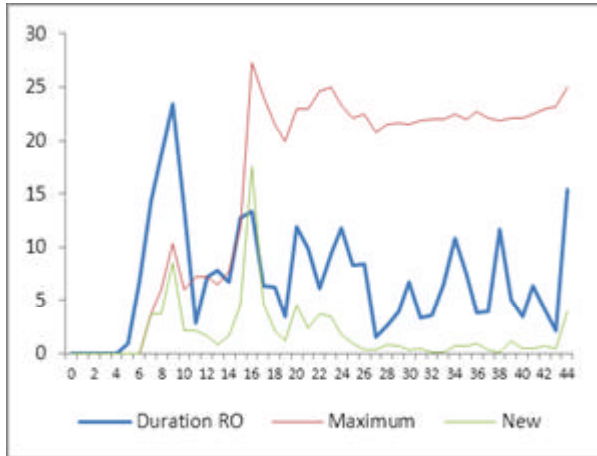


Figure 10-33. Distribution of duration data of reactor operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 1.

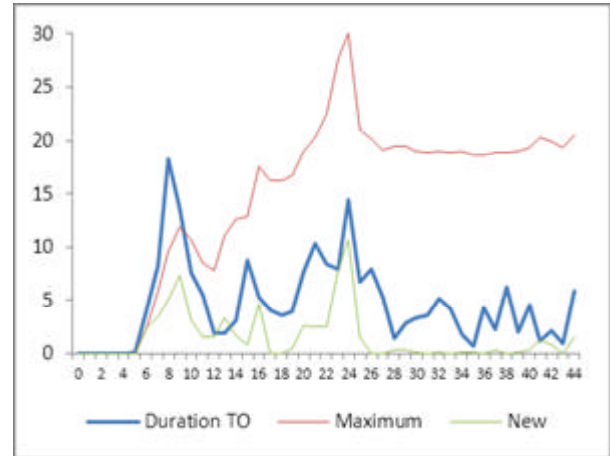


Figure 10-34. Distribution of duration data of turbine operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 1.

The trend analysis of the second scenario is presented in Figure 10-35. In scenario 2, the time spent in the alarm system by the crews, reactor operators and turbine operators is described in Figure 10-35. The reactor power is at 97%. Three malfunctions were implemented in the scenario 2: a trap alarm in the leakage detection system, the trip of the turbine 50, and a steam line leakage outside containment. All three anomalies happened before the minute 11. The level of automation is limited and the complexity is low.

All crews detected the three transients. The first actions in the process taken by the crews varied between the minutes 13 and 26. The reactor scram was implemented manually between 15:15 and 26:50. Because of the steam leakage outside containment, the crews successfully isolated one of the steam generators. The six crews started the large boron program (from the minute 16 to 28). Further, during the available scenario time, two crews carried out the necessary actions for cooling down the primary and secondary side.

It can be observed that the operators looked at the alarm system during all scenario periods, except the first four minutes of the scenario 2. The first alarm of the reactor operators was announced during the minute 6 (the trap alarm in the leakage detection system in the auxiliary building). The first alarm of the turbine operators was during the minute 9, indicating the turbine 50 trip. The monitoring phase is until minute 6 for the reactor operators and minute 9 for the turbine operators.

In most of the periods, except at the last minutes, the reactor operators provide higher scores on the alarm system than the turbine operators.

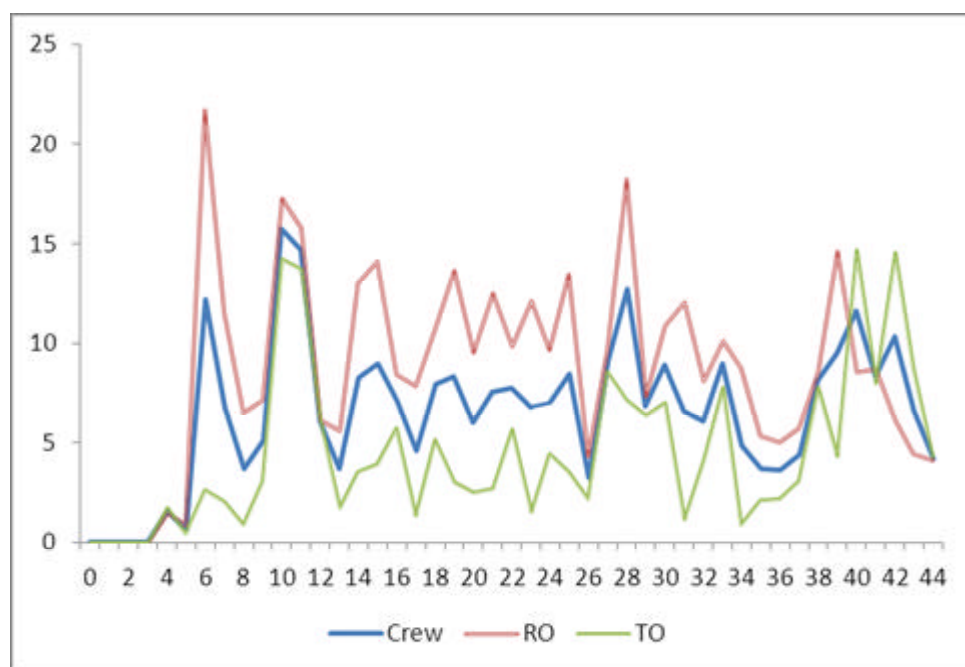


Figure 10-35. Distribution of duration data of alarm system along scenario 2.

Figures 10-36 and 10-37 present the duration of the operators in the alarm system as well as the new incoming alarms and the maximum number of active alarms during the scenario periods.

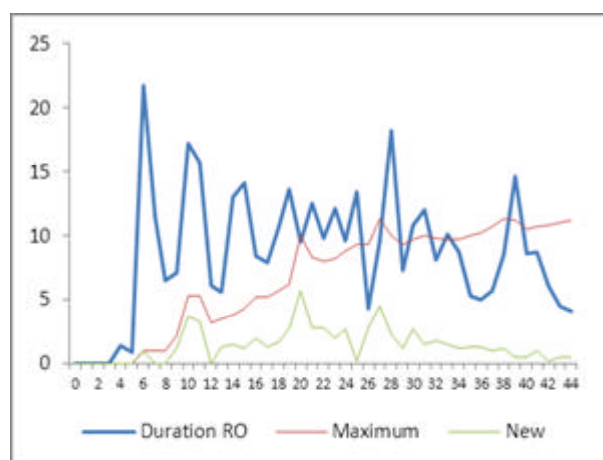


Figure 10-36. Distribution of duration data of reactor operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 2.

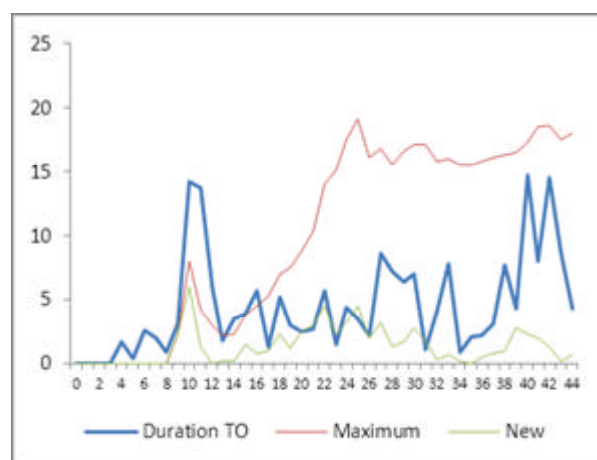


Figure 10-37. Distribution of duration data of turbine operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 2.

The trend analysis of the scenario 3 is presented in Figure 10-38. In scenario 3, the time spent in the alarm system by the crews, reactor operators and turbine operators is described in Figure 10-38. The scenario 3 consist of five transients: initially in the scenario a spray valve in the cooling down line for the pressurizer is left open by mistake; the opening of the control valve YP11S003 in the spray line for cooling down of the pressurizer; the opening of a turbine bypass valve; a leakage in the pressure manifold of a feedwater pump RL20, outside containment; and a fire alarm. The level of automation is limited and the complexity is high.

An important difference between this scenario and the other scenarios is that the reactor power was under critical, with all the control rods inserted. At the beginning of the scenario, some alarms were already in the alarm screens: 2 alarms for the reactor operators and 11 to the turbine operators. Another characteristic of the scenario is also that some of the malfunctions were implemented after the minute 20.

The crews detected the anomaly of the open spray valve in the cooling down line for the pressurizer when identified the opening of the control valve in the spray line (between approximately the minutes 10 and 21). One of the crews did not observe the opening of the turbine bypass. All crews isolated the leakage in the pressure manifold of the feedwater pumps (between the minute 20 and 38). Further, the operators started the boron program between the minutes 13 and 35. Also, the reactor scrammed and the turbine tripped between the minutes 13 and 35.

It can be observed that the operators looked at the alarm system during all scenario periods. In most of the periods, except at the first minutes, the reactor operators provide higher scores on the alarm system than the turbine operators.

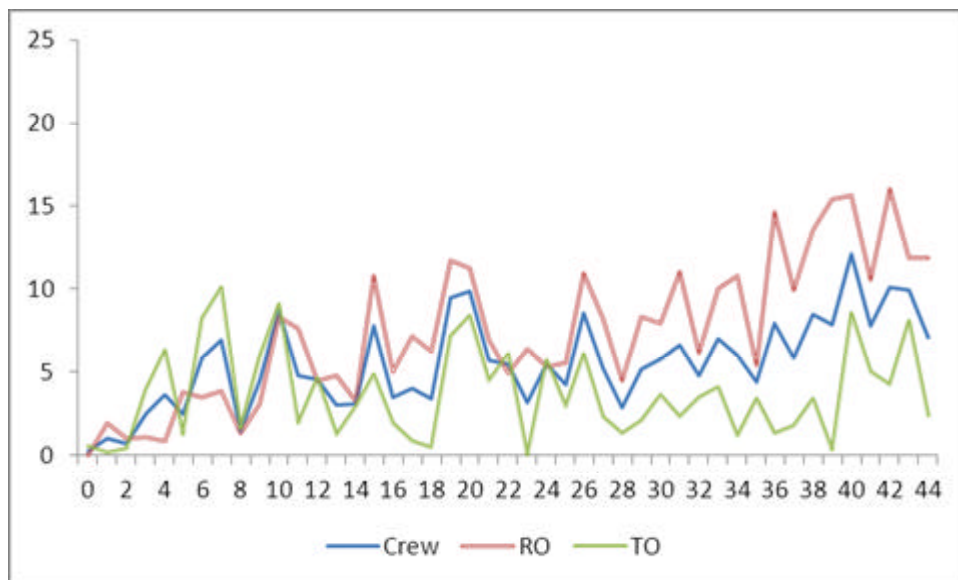


Figure 10-38. Distribution of duration data of alarm system along scenario 3.

Figures 10-39 and 10-40 present the duration of the operators in the alarm system as well as the new incoming alarms and the maximum number of active alarms during the scenario periods. The scale is adapted at a maximum of 45 seconds per minute, or amount of alarms in the period, for allowing comparisons between the duration data of the operators. A larger amount of alarms was announced to the turbine operators, mainly due to the existence of some repeated (nuisance) alarms during the last scenario periods.

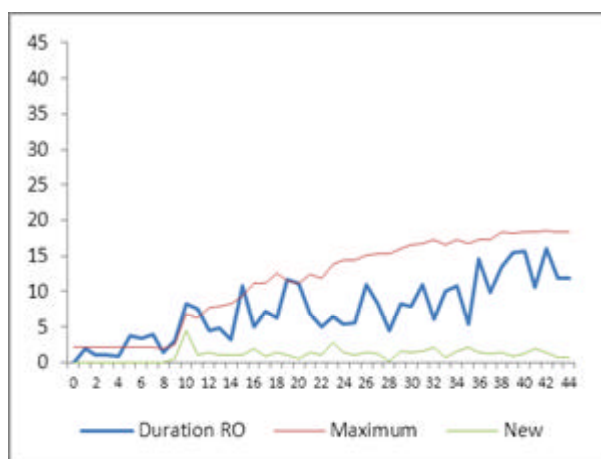


Figure 10-39. Distribution of duration data of reactor operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 3.

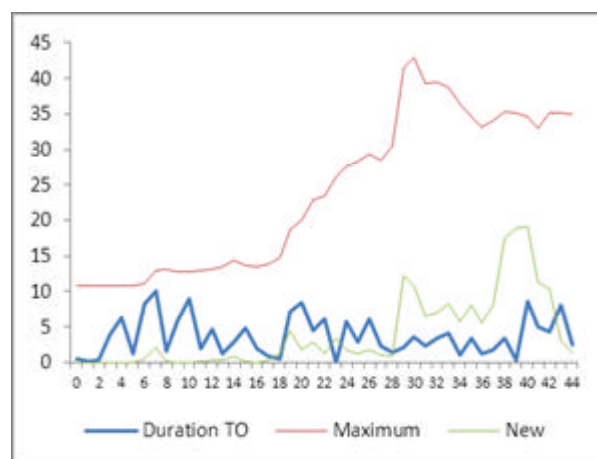


Figure 10-40. Distribution of duration data of turbine operators in relation to the presentation of new alarms in scenario 3.

10.9.3 Summary of results of roles of alarm system

The results of duration data indicate that the operators spent time gazing at the alarm system in the different phases of all the scenarios: monitoring, detection, and decision making and response implementation. Less amount of time on the alarm system happens in the monitoring phase.

The allocated time to the alarm information seems to depend on the scenario phase and the scenario type. For explaining in detailed the information processing activities of the operators, a qualitative analysis of the crew activities in every scenario needs to be considered. Appendix F provides a general description of crew actions in the three scenarios.

10.10 HYPOTHESIS 6 ON QUADRATIC TREND ON DETECTION PHASE

10.10.1 Hypothesis on quadratic trend

The use of alarm information will follow a quadratic trend with the appearance of anomalies, during the detection phase, i.e., the increase and then the decrease of the visual activity in the alarm AOIs in function of the time.

10.10.2 Data analysis of quadratic trend

The hypothesis was explored with trend analysis. For testing the prediction, our main focus is on those transients with an associated alarm. Figures 10-41, 10-42 and 10-43 present the results of the scenarios 1, 2 and 3, respectively. The horizontal axis indicates the time of occurrence, in one-minute scenario periods. The vertical axis presents the duration and frequency data of the alarm AOIs.

A quadratic effect is found in the scenario 1, as can be seen in Figure 10-41, between the minute 5 and 12 (see the horizontal axis). This corresponds with the trip of a feedwater pump, a faulty reactor scram signal, and the opening of the steam generator safety relief valve RA13.

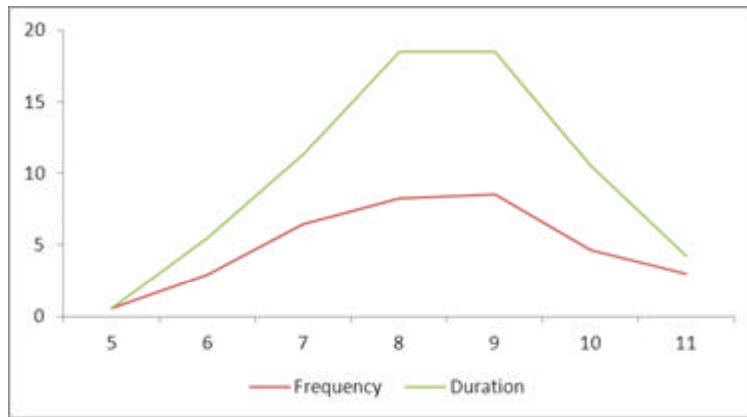


Figure 10-41. Quadratic effect in frequency and duration of alarm data in scenario 1.

In the scenario 2, quadratic effects were observed between the minutes 5 and 7, and between 9 and 13. In the minute 6, a trap alarm occurred, and in the minute 10 a turbine trip; also a steam line leakage, outside the containment, was implemented at the minute 11.

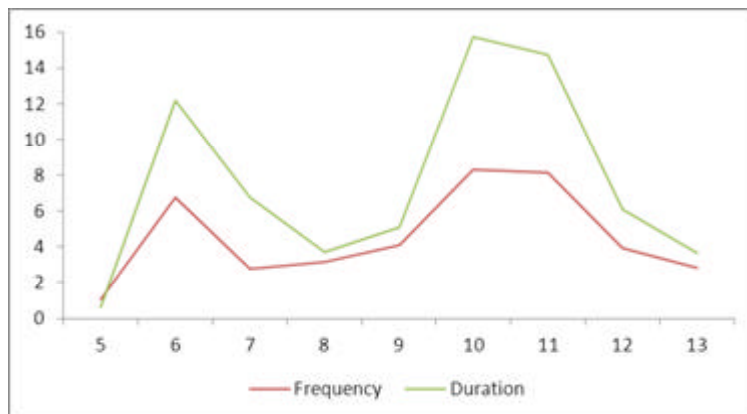


Figure 10-42. Quadratic effect in frequency and duration of alarm data in scenario 2.

In the scenario 3, the main effects seem to relate with some of the malfunctions: the opening of the valve YP11S003 (minute 10), the opening of the turbine bypass valve RC51S003 (minute 15), and a leakage on the feedwater pump RL20 (minute 19-20). Even if the disturbances were not announced with an associated alarm, several relevant alarms were activated during the periods.

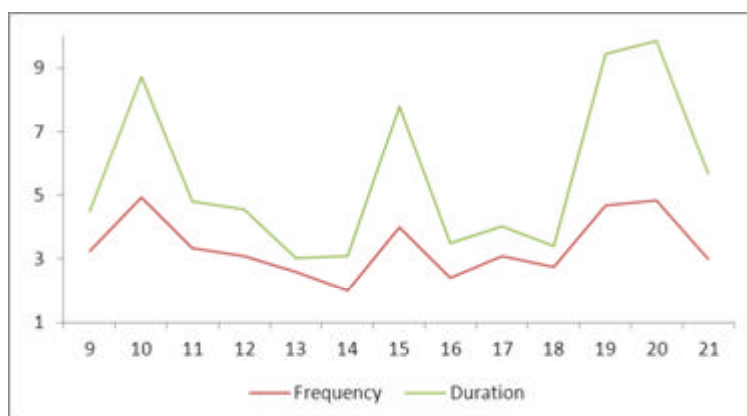


Figure 10-43. Quadratic effect in frequency and duration of alarm data in scenario 3.

In fact, as can be observed in Table 10-62, the frequency data and duration data in scenarios 2 and 3 conform to more than one statistically significant effect, covering the lineal, quadratic and cubic. The data of frequency and of duration of the scenario 1 present a tendency to the lineal effect and quadratic effect; and, cubic effect is statistically significant. The trend analysis provides the statistical results presented in Table 10-62.

Table 10-62. *Summary of Main Effects (Lineal, Quadratic and Cubic) in Scenarios 1, 2 and 3*

Scenario	Alarm System	Effect		
		Lineal	Quadratic	Cubic
Scenario 1	Frequency data	.056 ⁽⁺⁾	.069 ⁽⁺⁾	.000 ^(***)
	Duration data	.079 ⁽⁺⁾	.076 ⁽⁺⁾	.002 ^(**)
Scenario 2	Frequency data	.001 ^(***)	.001 ^(***)	.000 ^(***)
	Duration data	.000 ^(***)	.000 ^(***)	.000 ^(***)
Scenario 3	Frequency data	.022 ^(*)	.000 ^(***)	.005 ^(**)
	Duration data	.025 ^(*)	.000 ^(***)	.008 ^(**)

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$. (***) $p < .001$. (+) $p < .10$.

10.10.3 Summary of results of quadratic trend

Quadratic trends have been found in periods of all three scenarios. However, different main effects are found during the scenario periods.

The quadratic trends correspond to the implementation of relevant alarms which indicating the cause of the simulated disturbances in the scenarios 1 and 2. In the scenario 3, the quadratic effect seems also to be related to the implementation of the transients. The origin of the disturbance is not directly explained by an alarm, but there are alarms indicating the deviation from the normal process conditions, for example, the decrease in the pressure and an unexpected cooling down, when the control valve (YP11S003) opens, if the operator has not previously observed the state of the valve (YP11S001).

10.11 HYPOTHESES 7 AND 8 RELATED TO AN EQUALLY DISTRIBUTION OF DATA FOR EACH CREW IN ALL SCENARIOS

In these two hypotheses, the scope is in testing the homogeneity in the distribution of the number and the duration of the visual accesses in all alarm AOIs across the three scenarios.

10.11.1 Hypotheses on homogeneity of alarm distribution data

The duration and frequency data of the alarm system, alarm list, alarm tile, and the four AOIs of the alarm list –alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of alarm list– will be evenly distributed for all crews across three scenarios.

10.11.2 Data analyses of homogeneity, with ANOVA for total scenario time

The number of visual accesses to the alarm system for the total scenario time has been analyzed with ANOVA, with one fixed factor and repeated measures. In the same way, the percentage of time gazing at the alarm system for the total scenario time was explored with ANOVA, with one fixed factor and repeated measures. The possible interaction effects between the AOIs of the alarm system and the operator role (reactor versus turbine operator) are explored for every scenario. The

number of visual accesses to the alarm system, as well as the percentage of time gazing at the alarm system, has been considered with between scenarios designs: the alarm system was analyzed across scenarios. The analyses refer to the number of visual accesses to the alarm system, alarm tile, alarm list, and all four AOIs of the alarm list.

The F statistics have been calculated⁶⁶, in the case of three or more alarm AOIs, with the sphericity assumed or the Huynh-Feldt correction, according to the Mauchly's sphericity test (i.e., if the significance level of the Mauchly's test is lower than .05, Huynh-Feldt is employed because the sphericity cannot be assumed). In the cases with significant effects, the paired comparisons (or pairwise comparisons) were analyzed with the Bonferroni correction to control the significance at .05. The effect size has been estimated with partial Eta-squared. When a significant interaction effect (the alarm AOI by the operator effect) is detected (including the tendency to an effect with $p < .10$), the Bonferroni corrected confidence intervals are considered for not having an overlapping of the confidence intervals of the operators with the alarm AOIs. In the post hoc tests, the significant results ($p < .05$) of the contrast in the alarm AOIs are examined with the Student's distribution.

10.11.2.1 Number of visual accesses to alarm areas of interest with between scenario design

The ANOVA analyses, repeated measures, of the number of visual accesses to the alarm system, alarm tile, alarm list, and the four AOIs of alarm list –alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of alarm list– were carried out across three scenarios, i.e., between scenario designs. The designs were 2x3: the operator role (reactor or turbine operator) and the number of visual accesses to the alarm AOIs in three scenarios. The results of analyses are separately presented for every alarm AOI.

10.11.2.1.1 Number of visual accesses to alarm system

The number of visual accesses to the alarm system was analyzed with the ANOVA repeated measures, in order to explore possible interaction effects between the alarm system and the operator role across three scenarios. The effects of the alarm system, the operator role and the interaction of alarm system by the operator are shown for all scenarios in Tables 10-63, 10-64 and 10-65.

Table 10-63. *Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	7.30	0.87
Turbine Operator	3.82	0.87

Table 10-64. *Alarm System (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	5.05	0.67
Scenario 2	6.17	0.53
Scenario 3	5.45	0.80

Table 10-65. *Means and SD of Alarm System by Operator Role*

Alarm System in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm system in Scenario 1	RO	5.98	2.68	Alarm System: 2.593 (2,20)	.100 ⁽⁺⁾	Scenario 2 > Scenarios 1 and 3
	TO	4.13	1.93			
	Total	5.05	2.43			
Alarm system in Scenario 2	RO	8.54	2.17	Operator: 8.032 (1,10)	.018 ^(*)	RO > TO
	TO	3.81	1.37			
	Total	6.17	3.02			

⁶⁶ All the ANOVA analysis of the frequency and duration data of this document followed the above-described procedure for exploring statistically significant results.

Alarm System in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	<i>SD</i>	F (df). AOI, Operator and Interaction	<i>p</i> -value	Paired comparison
Alarm system in Scenario 3	RO	7.38	3.36	Alarm system by Operator: 4.380 (2,20)	.026 ^(*)	Scenario 2 and RO
	TO	3.53	2.05			
	Total	5.45	3.33			
^(*) <i>p</i> < .05.	^(**) <i>p</i> < .01.	^(***) <i>p</i> < .001.	⁽⁺⁾ <i>p</i> < .10.			

There is a tendency to an alarm system effect. The operators make a higher number of visual accesses to the alarm system in the scenario 2 than in the scenarios 1 and 3.

A statistically significant operator effect indicated that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system than the turbine operators.

A statistically significant interaction effect of the alarm system by the operator role occurred. The interaction effect is in the scenario 2 and the reactor operators, according to the confidence intervals of Table 10-66, i.e., there is not an overlapping of the confidence intervals of the reactor and turbine operators with the alarm system. The reactor operators provide a higher score than the turbine operators in the scenario 2 (see Figure 10-44).

Table 10-66. *Alarm System by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios*

Operator	Alarm System	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Scenario 1	5.98	0.95	3.850	8.100
	Scenario 2	8.54	0.74	6.884	10.193
	Scenario 3	7.38	1.17	4.845	9.909
Turbine Operator	Scenario 1	4.13	0.95	2.004	6.253
	Scenario 2	3.81	0.74	2.154	5.463
	Scenario 3	3.53	1.14	1.000	6.064

Figure 10-44 shows the means of the number of visual accesses to the alarm system, based on the operator role, in each scenario.

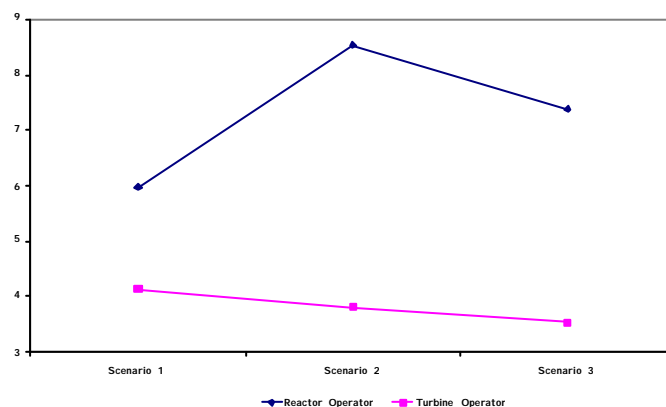


Figure 10-44. Means of frequency of alarm system by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm system, the operator role and their interactions are included in Table 10-67.

Table 10-67. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm System in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Alarm Tile (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm system	.457	.206	.724	.445	.689	.305

10.11.2.1.2 Number of visual accesses to alarm tile

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm tile, the operator and the interaction of the alarm tile by operator are shown for all the scenarios (see Tables 10-68, 10-69 and 10-70).

Table 10-68. *Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	3.06	0.34
Turbine Operator	1.40	0.34

Table 10-69. *Alarm Tile (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	1.99	0.22
Scenario 2	2.43	0.22
Scenario 3	2.27	0.35

Table 10-70. *Means and SD of Alarm Tile by Operator Role*

Alarm Tile in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm tile in Scenario 1	RO	2.56	0.79	Alarm System: 2.288 (2,20)	.127	
	TO	1.41	0.72			
	Total	1.99	0.94			
Alarm tile in Scenario 2	RO	3.38	0.89	Operator: 11.701 (1,10)	.007 ^(**)	RO > TO
	TO	1.49	0.62			
	Total	2.43	1.23			
Alarm tile in Scenario 3	RO	3.23	1.52	Alarm system by Operator: 2.137 (2,20)	.144	
	TO	1.31	0.79			
	Total	2.27	1.53			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant effect indicates that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm tile AOI than the turbine operators. The lack of an interaction effect ($p > .05$) reveals that the operator effect was similar across scenarios.

Figure 10-45 shows the means of the number of visual accesses to the alarm tile, based on the operator role, in each scenario.

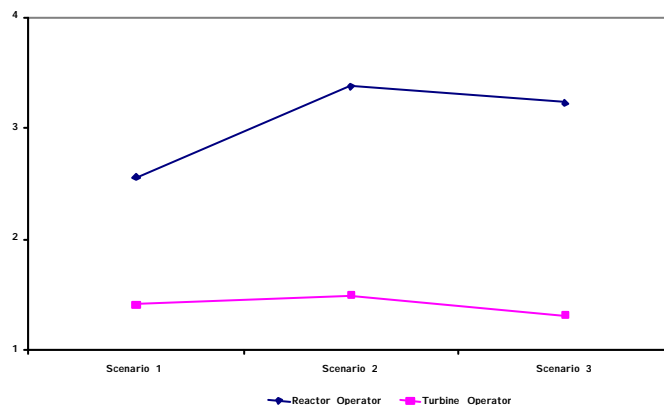


Figure 10-45. Means of frequency of alarm tile by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm tile, the operator role and their interactions are included in Table 10-71.

Table 10-71. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Tile in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Alarm Tile (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm tile	.410	.186	.868	.539	.386	.176

10.11.2.1.3 Number of visual accesses to alarm list

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm list, of the operator and their interaction are shown in three scenarios (see Tables 10-72, 10-73 and 10-74).

Table 10-72. *Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	4.24	0.58
Turbine Operator	2.42	0.58

Table 10-73. *Alarm List (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	3.07	0.52
Scenario 2	3.74	0.35
Scenario 3	3.18	0.48

Table 10-74. *Means and SD of Alarm List by Operator Role*

Alarm List in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm list in Scenario 1	RO	3.41	2.17	Alarm System: 2.298 (2,20)	.126	
	TO	2.72	1.30			
	Total	3.06	1.74			
Alarm list in Scenario 2	RO	5.16	1.52	Operator: 4.887 (1,10)	.052 ⁽⁺⁾	RO > TO
	TO	2.32	0.82			
	Total	3.74	1.88			
Alarm list in Scenario 3	RO	4.15	1.98	Alarm system by Operator: 5.114 (2,20)	.016 ^(*)	Scenario 2 and RO
	TO	2.22	1.27			
	Total	3.18	1.88			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

The tendency to an operator effect indicates that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm list AOI than the turbine operators.

A statistically significant effect of the alarm list by the operator role was found in the scenario 2 and the reactor operators, according to the confidence intervals of Table 10-75 (i.e., there is not an overlapping of the confidence intervals of reactor and turbine operators with the alarm list). The reactor operators provide a higher score than turbine operators in the scenario 2 (see Figure 10-46).

Table 10-75. *Alarm List by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios*

Operator	Alarm List	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Scenario 1	3.41	0.73	1.783	5.040
	Scenario 2	5.16	0.50	4.051	6.266
	Scenario 3	4.15	0.68	2.633	5.664
Turbine Operator	Scenario 1	2.72	0.73	1.090	4.347
	Scenario 2	2.32	0.50	1.214	3.429
	Scenario 3	2.22	0.68	0.701	3.732

Figure 10-46 shows the means of the number of visual accesses to the alarm list in each scenario, considering the operator role.

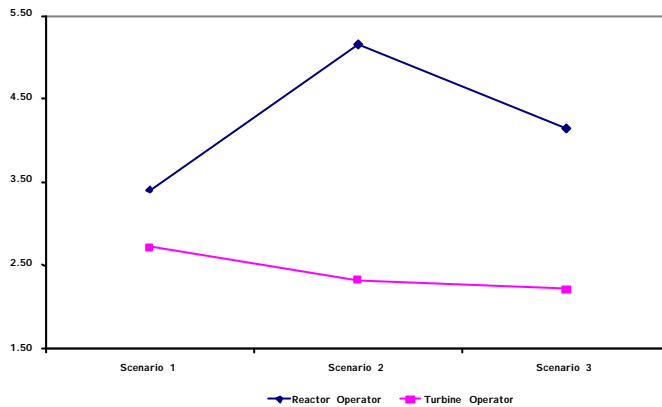


Figure 10-46. Means of frequency of alarm list by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm list, operator role and their interactions are included in Table 10-76.

Table 10-76. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm List (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list	.411	.187	.515	.328	.759	.338

10.11.2.1.4 Number of visual accesses to alarm tag

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm tag, the operator and their interaction are shown for three scenarios (see Tables 10-77, 10-78 and 10-79).

Table 10-77. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.10	0.31
Turbine Operator	1.25	0.31

Table 10-78. Alarm Tag (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	1.48	0.19
Scenario 2	1.73	0.32
Scenario 3	1.83	0.29

Table 10-79. Means and SD of Alarm Tag by Operator Role

Alarm Tag in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm tag in Scenario 1	RO	1.57	0.73	Alarm System: 0.785 (2,20)	.470	RO > TO
	TO	1.38	0.61			
	Total	1.48	0.65			
Alarm tag in Scenario 2	RO	2.23	1.47	Operator: 3.833 (1,10)	.079 ⁽⁺⁾	
	TO	1.22	0.57			
	Total	1.73	1.19			
Alarm tag in Scenario 3	RO	2.50	1.25	Alarm system by Operator: 2.041 (2,20)	.156	
	TO	1.16	0.67			
	Total	1.83	1.18			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A tendency to an operator effect indicates that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm tag AOI than the turbine operators.

Figure 10-47 shows the means of the number of visual accesses to the alarm tag, based on the operator role, in each scenario.

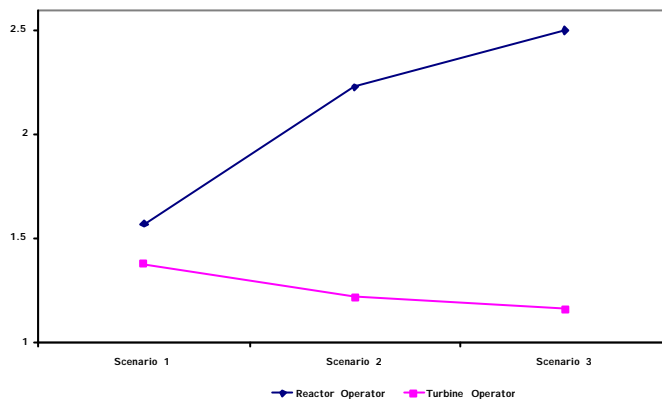


Figure 10-47. Means of Frequency of Alarm Tag by Operator Role by Scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm tag, the operator role and their interactions are included in Table 10-80.

Table 10-80. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Tag in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm Tag (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm tag	.165	.073	.425	.277	.370	.170

10.11.2.1.5 Number of visual accesses to alarm text

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm text, the operator and the interaction of alarm text by operator are shown for all scenarios in Tables 10-81, 10-82 and 10-83.

Table 10-81. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	3.99	0.70
Turbine Operator	2.71	0.70

Table 10-82. Alarm Text (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	3.25	0.62
Scenario 2	3.61	0.46
Scenario 3	3.18	0.56

Table 10-83. Means and SD of Alarm Text by Operator Role

Alarm Text in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm text in Scenario 1	RO	3.31	2.61	Alarm System: 0.654 (2,20)	.531	
	TO	3.19	1.52			
	Total	3.25	2.04			
Alarm text in Scenario 2	RO	4.51	2.07	Operator: 1.670 (1,10)	.225	
	TO	2.70	0.88			
	Total	3.61	1.79			
Alarm text in Scenario 3	RO	4.14	2.36	Alarm system by Operator: 3.172 (2,20)	.064 ⁽⁺⁾	Scenario 3 and RO
	TO	2.22	1.38			
	Total	3.18	2.10			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A tendency to an interaction effect of the alarm text by the operator position is explained by the scenario 3 and the reactor operators. There is an overlapping of confidence intervals of the reactor and turbine operators with the scenario type (see Table 10-84), but there is a wider distance in the scenario 3 (Figure 10-48). The reactor operators provide a higher score in the alarm text than the turbine operators in the scenario 3.

Table 10-84. *Alarm Text by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios*

Operator	Alarm Text	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor	Scenario 1	3.31	0.87	1.374	5.259
Operator	Scenario 2	4.51	0.65	3.067	5.960
	Scenario 3	4.14	0.79	2.388	5.898
Turbine	Scenario 1	3.19	0.87	1.249	5.134
Operator	Scenario 2	2.70	0.65	1.258	4.152
	Scenario 3	2.22	0.79	0.467	3.977

Figure 10-48 shows the means of the number of visual accesses to the alarm text, considering the operator role, in three scenarios.

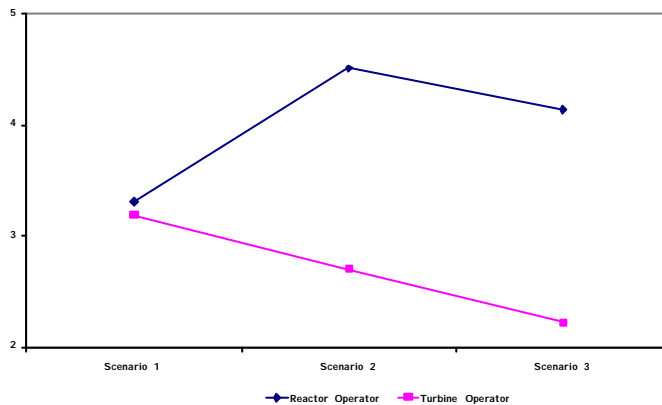


Figure 10-48. Means of frequency of alarm text by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm text, operator role and their interactions are in Table 10-85.

Table 10-85. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Text in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Alarm Text (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm text	.144	.061	.216	.143	.541	.241

10.11.2.1.6 Number of visual accesses to alarm value

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm value, the operator and their interaction are shown for the three scenarios (see Tables 10-86, 10-87 and 10-88).

Table 10-86. *Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	1.20	0.26
Turbine Operator	0.85	0.26

Table 10-87. *Alarm Value (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	0.89	0.23
Scenario 2	1.08	0.18
Scenario 3	1.11	0.26

Table 10-88. *Means and SD of Alarm Value by Operator Role*

Alarm Value in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm value in Scenario 1	RO	0.90	0.93	Alarm System: 0.593 (1.358,13.580)	.504	
	TO	0.88	0.63			
	Total	0.89	0.76			
Alarm value in Scenario 2	RO	1.28	0.76	Operator: 0.899 (1,10)	.365	
	TO	0.87	0.47			
	Total	1.08	0.64			
Alarm value in Scenario 3	RO	1.43	1.11	Alarm system by Operator: 1.007 (1.358,13.580)	.360	
	TO	0.80	0.64			
	Total	1.11	0.92			

(*) $p < .05$.(**) $p < .01$.(***) $p < .001$.(+) $p < .10$.

The analysis did not reveal a statistically significant effect.

Figure 10-49 shows the means of the number of visual accesses to the alarm value, based on the operator role, in each scenario.

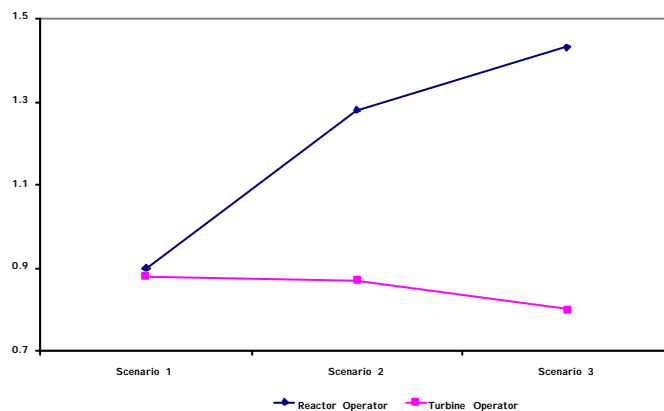


Figure 10-49. Means of frequency of alarm value by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm value, operator role and their interactions are presented in Table 10-89.

Table 10-89. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Alarm Value in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Alarm Value (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm value	.118	.056	.138	.082	.168	.091

10.11.2.1.7 Number of visual accesses to time and other parts of alarm list

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of time and other parts of alarm list, the operator role and their interaction are shown for three scenarios in Tables 10-90, 10-91 and 10-92.

Table 10-90. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	1.20	0.09
Turbine Operator	0.36	0.09

Table 10-91. Time and Others (Frequency): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	0.42	0.07
Scenario 2	1.19	0.12
Scenario 3	0.72	0.11

Table 10-92. Means and SD of Time and Other Parts of Alarm List by Operator Role

Time and other parts of list in Scenario (Freq.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Time and others in Scenario 1	RO	0.60	0.26	Alarm System: 15.545 (2,20)	.000 ^(***)	Scenario 2 > Scenarios 1 and 3
	TO	0.24	0.21			
	Total	0.42	0.30			
Time and others in Scenario 2	RO	1.94	0.50	Operator: 45.385 (1,10)	.000 ^(***)	RO > TO
	TO	0.44	0.27			
	Total	1.19	0.87			
Time and others in Scenario 3	RO	1.06	0.43	Alarm system by Operator: 8.891 (2,20)	.002 ^(**)	Scenario 2 and RO
	TO	0.38	0.36			
	Total	0.72	0.52			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A highly statistically significant effect of time and other parts of the alarm list AOI occurred. The operators make a higher number of visual accesses to time and other parts of the alarm list in the scenario 2 than in the scenarios 1 and 3.

A highly statistically significant operator position effect indicates that the reactor operators present a higher number of visual accesses to time and other parts of the alarm list than the turbine operators.

A statistically significant interaction effect of time and other parts of the alarm list by the operator role is found in the scenario 2 and the reactor operators, according to the confidence intervals of Table 10-93 (i.e., there is not an overlapping of the confidence intervals of the reactor and turbine operators with the AOI). The reactor operators provide a higher score than the turbine operators in the scenario 2 (see Figure 10-50).

Table 10-93. Time and Other Parts of Alarm List by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios

Operator	Time and other parts of list	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Scenario 1	0.60	0.10	0.389	0.821
	Scenario 2	1.94	0.16	1.575	2.305
	Scenario 3	1.06	0.16	0.704	1.423
Turbine Operator	Scenario 1	0.24	0.10	0.028	0.459
	Scenario 2	0.44	0.16	0.078	0.808
	Scenario 3	0.38	0.16	0.022	0.741

Figure 10-50 shows the means of visual accesses to time and other parts of the alarm list in each scenario, considering the operator role.

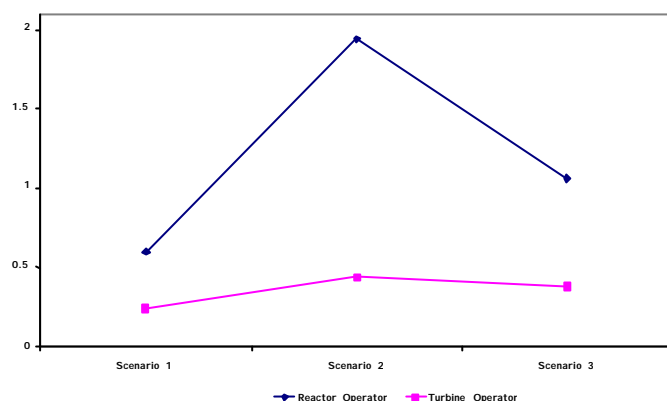


Figure 10-50. Means of frequency of time and other parts of alarm list by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of time and other parts of the alarm list, the operator role and their interactions are included in Table 10-94.

Table 10-94. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to Time and Other Parts of Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Others (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Time and other parts	.998	.609	.999	.819	.947	.471

10.11.2.1.8 Summary of main results of number of visual accesses to alarm areas of interest across three scenarios

The main results of the number of visual accesses to the alarm AOIs, across scenarios, are included in Table 10-95:

- A statistically significant effect of the alarm system in time and other parts of the alarm list AOI related to the operators making a higher number of visual accesses in the scenario 2 than in the scenarios 1 and 3.
- Three statistically significant effects of the operator position in the AOIs of the alarm system, the alarm tile, and time and other parts of the alarm list were found. Two tendencies to an operator effect in the AOIs of the alarm list and alarm tag also existed. The reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm AOIs than the turbine operators.
- Three statistically significant interaction effects in the alarm system, the alarm list, and time and other parts of the alarm list were identified, which are explained by the scenario 2 and the reactor operators. Also a tendency to an interaction effect in the alarm text is in the scenario 3 and the reactor operators.

Table 10-95. *Main Results of Frequency Data of All Alarm Areas of Interest across Scenarios*

Scenarios 1, 2, 3	Alarm AOI Effect in Scenario	Operator Effect	Interaction Effect
Alarm System		RO > TO ($p = .018$)	Scenario 2 and RO ($p = .030$)
Alarm Tile		RO > TO ($p = .007$)	
Alarm List		RO > TO ($p = .052$)	Scenario 2 and RO ($p = .022$)
Alarm Tag		RO > TO ($p = .079$)	
Alarm Text			Scenario 3 and RO ($p = .064$)
Alarm Value			
Time and others	Scen. 2 > Scen. 1 & 3 ($p < .001$)	RO > TO ($p < .001$)	Scenario 2 and RO ($p = .002$)

10.11.2.2 Percentage of time gazing at alarm areas of interest with between scenario design

The ANOVA analyses of the duration of visual accesses to the alarm system, the alarm tile, the alarm list, and the four AOIs of the alarm list –alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of the alarm list– were carried out across three scenarios (i.e., between scenario designs). The designs were 2x3: the operator position (reactor or turbine) and the total duration time of the alarm AOIs in three scenarios. The results are separately presented for every alarm AOI.

10.11.2.2.1 Percentage of time gazing at alarm system

The percentage of time gazing at the alarm system has been analyzed with the ANOVA repeated measures, in order to explore the possible interaction effects between the alarm system and the operator role across the scenarios. The statistical effects of the alarm system, the operator and the interaction of alarm system by operator are shown for all scenarios in Tables 10-96, 10-97 and 10-98.

Table 10-96. *Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	12.82	0.85
Turbine Operator	7.21	0.85

Table 10-97. *Alarm System (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	9.70	0.87
Scenario 2	11.08	0.72
Scenario 3	9.25	0.99

Table 10-98. *Means and SD of Alarm System by Operator Role*

Alarm System in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm system in Scenario 1	RO	11.57	3.98	Alarm System: 1.561 (2,20)	.234	
	TO	7.84	1.44			
	Total	9.70	3.46			
Alarm system in Scenario 2	RO	14.54	2.16	Operator: 21.793 (1,10)	.001 ^(***)	RO > TO
	TO	7.62	2.76			
	Total	11.08	4.32			
Alarm system in Scenario 3	RO	12.34	4.17	Alarm system by Operator: 1.190 (2,20)	.325	
	TO	6.16	2.51			
	Total	9.25	4.60			

(*) $p < .05$.(**) $p < .01$.(***) $p < .001$.(+) $p < .10$.

A statistically significant operator effect indicated that the reactor operators spent a larger percentage of time on the alarm system than the turbine operators. The lack of an interaction effect ($p > .05$) reveals that the operator effect was similar across scenarios.

Figure 10-51 shows the mean of percentage of time gazing at the alarm system, considering the operator role, in each scenario.

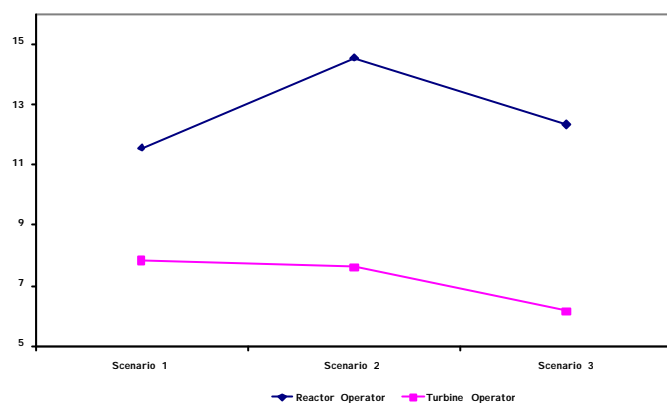


Figure 10-51. Means of duration of alarm system by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm system, the operator role and their interactions are included in Table 10-99.

Table 10-99. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm System in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm system	.292	.135	.987	.685	.230	.106

10.11.2.2.2 Percentage of time gazing at alarm tile

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm tile, the operator and the interaction of duration data are shown for all scenarios in Tables 10-100, 10-101 and 10-102.

Table 10-100. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	3.49	0.28
Turbine Operator	1.60	0.28

Table 10-101. Alarm Tile (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm Tile	Mean	SD
Scenario 1	2.59	0.21
Scenario 2	2.71	0.27
Scenario 3	2.34	0.29

Table 10-102. Means and SD of Alarm Tile by Operator Role

Alarm Tile in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm tile in Scenario 1	RO	3.46	0.87	Alarm System:	0.872 (2,20)	.433
	TO	1.73	0.54			
	Total	2.59	1.14			
Alarm tile in Scenario 2	RO	3.67	1.06	Operator:	23.306 (1,10)	.001 ^(***)
	TO	1.76	0.81			
	Total	2.71	1.34			
Alarm tile in Scenario 3	RO	3.35	1.26	Alarm system by Operator:	0.136 (2,20)	.874
	TO	1.32	0.61			
	Total	2.34	1.42			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant operator effect indicated that the reactor operators spent more time viewing the alarm tile AOI than the turbine operators.

Figure 10-52 shows the means of the percentage of time gazing at the alarm tile, based on the operator position in the team, in each scenario.

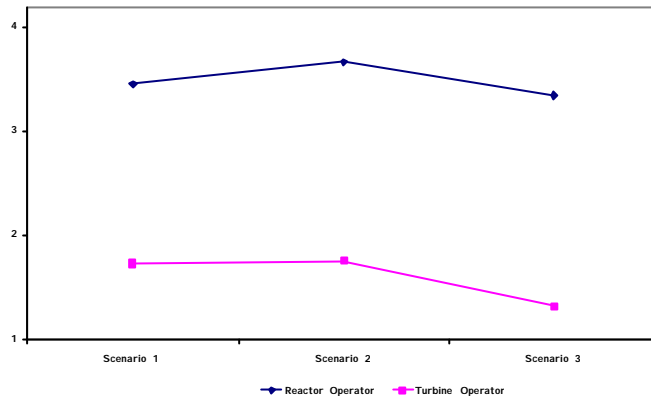


Figure 10-52. Means of duration of alarm tile by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm tile, the operator role and their interactions are included in Table 10-103.

Table 10-103. *Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Tile in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Alarm Tile (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm tile	.179	.080	.991	.700	.068	.013

10.11.2.2.3 Percentage of time gazing at alarm list

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm list, the operator role and the interaction of duration data for three scenarios are shown in Tables 10-104, 10-105 and 10-106.

Table 10-104. *Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	9.33	0.88
Turbine Operator	5.61	0.88

Table 10-105. *Alarm List (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3*

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	7.11	0.97
Scenario 2	8.37	0.59
Scenario 3	6.91	0.82

Table 10-106. *Means and SD of Alarm List by Operator Role*

Alarm list in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm list in Scenario 1	RO	8.12	4.55	Alarm System: 1.556 (2,20)	.236	RO > TO
	TO	6.11	1.34			
	Total	7.11	3.37			
Alarm list in Scenario 2	RO	10.87	1.94	Operator: 8.945 (1,10)	.014 ^(*)	
	TO	5.87	2.12			
	Total	8.37	3.25			
Alarm list in Scenario 3	RO	8.99	3.49	Alarm system by Operator: 1.489 (2,20)	.250	
	TO	4.84	2.02			
	Total	6.91	3.48			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant effect points out that the reactor operators spent a longer percentage of time on the alarm list AOI than the turbine operators.

Figure 10-53 shows the means of the percentage of time gazing at the alarm list, based on the operator role, in three scenarios.

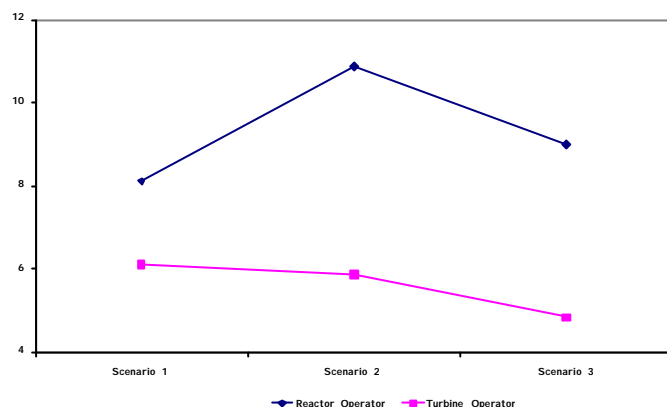


Figure 10-53. Means of duration of alarm list by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm list, the operator role and their interactions are included in Table 10-107.

Table 10-107. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm List (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list	.291	.135	.769	.472	.280	.130

10.11.2.2.4 Percentage of time gazing at alarm tag

The results of the ANOVA on the effects of the alarm tag, the operator role and their interaction are in Tables 10-108, 10-109 and 10-110.

Table 10-108. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	1.88	0.36
Turbine Operator	1.39	0.36

Table 10-109. Alarm Tag (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	1.49	0.24
Scenario 2	1.67	0.37
Scenario 3	1.73	0.25

Table 10-110. Means and SD of Alarm Tag by Operator Role

Alarm Tag in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm tag in Scenario 1	RO	1.55	0.90	Alarm System: 0.543 (2,20)	.589	
	TO	1.43	0.73			
	Total	1.49	0.78			
Alarm tag in Scenario 2	RO	1.92	1.39	Operator: 0.947 (1,10)	.353	
	TO	1.43	1.15			
	Total	1.67	1.24			
Alarm tag in Scenario 3	RO	2.17	0.94	Alarm system by Operator: 1.138 (2,20)	.340	
	TO	1.30	0.81			
	Total	1.74	0.96			

(*) $p < .05$.

(**) $p < .01$.

(***) $p < .001$.

(+) $p < .10$.

Not statistically significant effects were found for the alarm tag.

Figure 10-54 shows the means of the percentage of time gazing at the alarm tag in each scenario, considering the operator role.

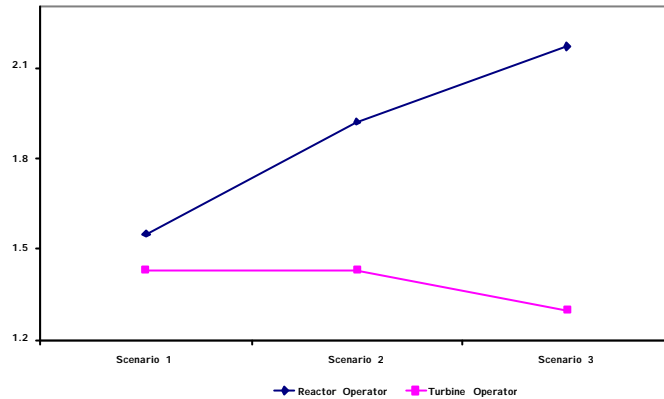


Figure 10-54. Means of duration of alarm tag by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm tag, the operator role and their interactions are included in Table 10-111.

Table 10-111. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Tag in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm Tag (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm tag	.127	.052	.143	.086	.222	.102

10.11.2.2.5 Percentage of time gazing at alarm text

The results of the ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm text, the operator role and the interaction are shown for all scenarios in Tables 10-112, 10-113 and 10-114.

Table 10-112. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	5.04	0.74
Turbine Operator	3.11	0.74

Table 10-113. Alarm Text (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	4.34	0.80
Scenario 2	4.40	0.53
Scenario 3	3.49	0.46

Table 10-114. Means and SD of Alarm Text by Operator Role

Alarm Text in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm text in Scenario 1	RO	4.98	3.77	Alarm System: 1.603 (2,20)	.226	
	TO	3.70	1.13			
	Total	4.34	2.74			
Alarm text in Scenario 2	RO	5.62	2.29	Operator: 3.464 (1,10)	.092 ⁽⁺⁾	RO > TO
	TO	3.18	1.26			
	Total	4.40	2.17			
Alarm text in Scenario 3	RO	4.53	1.95	Alarm system by Operator: 0.546 (2,20)	.588	
	TO	2.44	1.08			
	Total	3.49	1.86			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A tendency to an operator effect indicated that the reactor operators allocated more time to the alarm text AOI than the turbine operators.

Figure 10-55 shows the means of the percentage of time gazing at the alarm text in each scenario, based on the operator role.

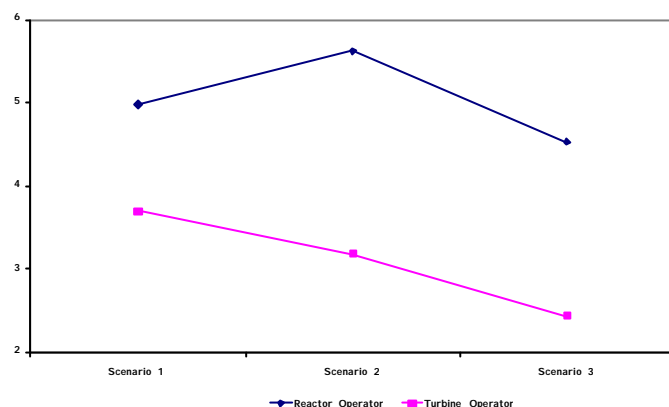


Figure 10-55. Means of duration of alarm text by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm text, the operator role and their interactions are included in Table 10-115.

Table 10-115. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Text in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm Text (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm text	.299	.138	.391	.257	.128	.052

10.11.2.2.6 Percentage of time gazing at alarm value

The results of ANOVA repeated measures for exploring the effects of the alarm value, the operator role and the interaction of alarm value by operator for all scenarios are included in Tables 10-116, 10-117 and 10-118.

Table 10-116. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	1.11	0.21
Turbine Operator	0.74	0.21

Table 10-117. Alarm Value (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	0.83	0.20
Scenario 2	0.93	0.15
Scenario 3	1.01	0.23

Table 10-118. Means and SD of Alarm Value by Operator Role

Alarm Value in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm value in Scenario 1	RO	0.88	0.86	Alarm System: 0.290 (1.631,16.307)	.708	
	TO	0.78	0.48			
	Total	0.83	0.67			
Alarm value in Scenario 2	RO	1.16	0.62	Operator: 1.618 (1,10)	.232	
	TO	0.70	0.39			
	Total	0.93	0.55			
Alarm value in Scenario 3	RO	1.29	0.92	Alarm system by Operator: 0.561 (1.631,16.307)	.547	
	TO	0.72	0.67			
	Total	1.00	0.82			

(*) $p < .05$.

(**) $p < .01$.

(***) $p < .001$.

(+) $p < .10$.

Not statistically significant effects were detected for the alarm value.

Figure 10-56 shows the mean of percentage of time gazing at the alarm value in each scenario, based on the operator role.

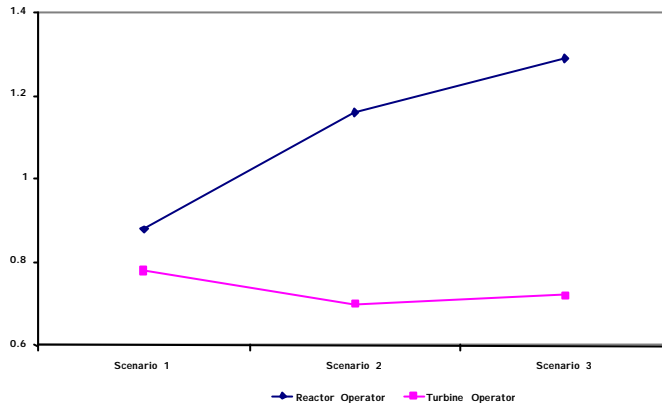


Figure 10-56. Means of duration of alarm value by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of the alarm value, the operator role and their interactions are included in Table 10-119.

Table 10-119. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Alarm Value in Scenarios 1, 2 and 3

Area of Interest	Alarm Value (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm value	.086	.028	.211	.139	.053	.121

10.11.2.2.7 Percentage of time gazing at time and other parts of alarm list

The results of ANOVA repeated measures for analyzing the effects of time and other parts of alarm list, the operator role, and their interaction are shown for all scenarios (see Tables 10-120, 10-121 and 10-122).

Table 10-120. Operator: Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	1.30	0.15
Turbine Operator	0.37	0.15

Table 10-121. Time and Others (Duration): Marginal Means and SD in Scenarios 1, 2 and 3

Alarm System	Mean	SD
Scenario 1	0.45	0.08
Scenario 2	1.36	0.24
Scenario 3	0.69	0.15

Table 10-122. Means and SD of Time and Other Parts of Alarm List by Operator Role

Time and other parts of list in Scenario (Durat.)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Time and others in Scenario 1	RO	0.71	0.34	Alarm System: 8.613 (2,20)	.002 ^(**)	Scenario 2 > Scenario 1
	TO	0.19	0.19			
	Total	0.45	0.37			
Time and others in Scenario 2	RO	2.18	1.03	Operator: 19.768 (1,10)	.001 ^(***)	RO > TO
	TO	0.55	0.52			
	Total	1.36	1.15			
Time and others in Scenario 3	RO	1.00	0.58	Alarm system by Operator: 3.631 (2,20)	.045 ^(*)	Scenario 2 and RO
	TO	0.38	0.45			
	Total	0.69	0.59			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant effect of time and other parts of alarm list AOI was found. The operators spent less percentage of time viewing the time and other parts of alarm list AOI in the scenario 1 than in the scenario 2.

The reactor operators spend more time on monitoring the time and other parts of alarm list AOI than the turbine operators, with a statistical significance.

A statistically significant interaction effect of time and other parts of alarm list by the operator role was obtained. The interaction effect is in the scenario 2 and the reactor operators, according to the confidence intervals of Table 10-123, i.e., there is not an overlapping of the confidence intervals of the reactor and turbine operators with the alarm AOI. The reactor operators provide a higher score than the turbine operators in the scenario 2 (see Figure 10-57).

Table 10-123. *Time and Other Parts of Alarm List by Operator (Interaction) Effect in Three Scenarios*

Operator	Time and other parts of list	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Scenario 1	0.71	0.11	0.461	0.956
Operator	Scenario 2	2.18	0.33	1.435	2.918
	Scenario 3	1.00	0.21	0.525	1.471
Turbine Operator	Scenario 1	0.20	0.11	-0.053	0.443
Operator	Scenario 2	0.55	0.33	-0.191	1.291
	Scenario 3	0.38	0.21	-0.095	0.851

Figure 10-57 shows the means of the percentage of time gazing at time and other parts of the alarm list in each scenario, taking into account the operator role.

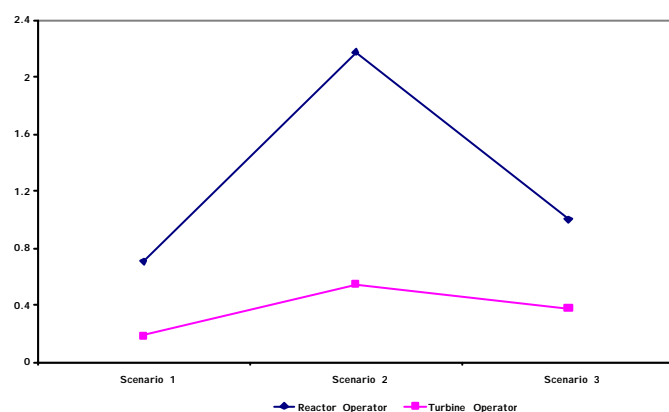


Figure 10-57. Means of duration of time and other parts of alarm list by operator role by scenario.

The statistical power and the effect size of time and other parts of alarm list, the operator role and their interactions are included in Table 10-124.

Table 10-124. *Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at Time and Other Parts of Alarm List in Scenarios 1, 2 and 3*

Area of Interest	Others (AOI)		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Time and other parts	.940	.463	.979	.664	.602	.266

10.11.2.2.8 Summary of main results of the percentage of time gazing at alarm areas of interest across three scenarios

A summary of statistically significant results of the number of visual accesses to the alarm AOIs, across scenarios, is included in Table 10-125:

- A statistically significant effect of the alarm system shows that the operators spent a larger percentage of time on monitoring the time and other parts of the alarm list AOI in the scenario 2 than in the scenario 1.
- Four statistically significant effects of the operator position in the team were detected in the AOIs of the alarm system, alarm tile, alarm list, and time and other parts of the alarm list. Also, a tendency to an operator effect happens in the alarm text. All results indicate that the percentage of time spent on the alarm AOIs by the reactor operators is larger than time of the turbine operators.
- A statistically significant interaction effect in the time and other parts of alarm list AOI is explained by the scenario 2 and the reactor operators.

Table 10-125. *Main Results of Duration Data of Alarm Areas of Interest across Scenarios*

Scenarios 1, 2, 3	Alarm AOI Effect in Scenario	Operator Effect	Interaction Effect
Alarm System		RO > TO ($p = .001$)	
Alarm Tile		RO > TO ($p = .001$)	
Alarm List		RO > TO ($p = .014$)	
Alarm Tag			
Alarm Text		RO > TO ($p = .092$)	
Alarm Value			
Time and others	Scenario 2 > Scenario 1 ($p = .002$)	RO > TO ($p = .001$)	Scenario 2 and RO ($p = .045$)

10.11.3 Summary of results of hypotheses of homogeneity of alarm distribution data

The results of ANOVA analyses across scenarios for all alarm AOIs, which covering the alarm system, the alarm tile, the alarm list and the four AOIs of the alarm list are as follows:

- A statistically significant effect indicated that the operators did more amount of visual accesses in the scenario 2 than in the scenarios 1 and 3 to the time and other parts of alarm list AOI. Statistically significant effects of operator role were found in the AOIs of alarm system, alarm tile, alarm list, and time and other parts of alarm list, in the direction of the reactor operators with higher scores. Also, three statistically significant interaction effects were detected in three of the AOIs (alarm system, alarm list, and time and other parts of alarm list), all attributed to the reactor operators and the scenario 2.
- A statistically significant effect indicated that the operators spent less percentage of time in the AOI of time and other parts of alarm list in the scenario 1 than in the scenario 2. The operator position in the duration data was statistically significant in the AOIs of alarm system, alarm tile, alarm list, and time and other parts of alarm list, in the direction of the reactor operators with higher scores. A statistically significant effect was found in time and other parts of the alarm list, because of the reactor operators and the scenario 2.

The results point to the operator performance in the scenario 2, in relation to the use of alarm system (both the frequency and duration data), being somehow different from the other scenarios. The design of scenario 2 presented a low complexity and a limited automation level. As was explained earlier, the reactor operators employ the alarm system more times and for a longer period.

10.12 HYPOTHESES 9 AND 10 ON FREQUENCY AND DURATION DATA ON ALARM LIST VERSUS ALARM TILE

In these hypotheses the role of the alarm list and the alarm tile is investigated in relation to the number of fixations and the fixation time in the two AOIs.

10.12.1 Hypotheses on frequency and duration data of alarm list versus alarm tile

Two hypotheses are formulated in the use of alarm list versus alarm tile:

- The number of operator's visual accesses to the alarm tile will be statistically significant smaller than to the alarm list.
- The duration time of the operator's visual accesses to the alarm tile will be statistically significant smaller than to the alarm list.

For the frequency and duration data of the two alarm system AOIs, a prediction is related to not finding differences due to the operator position. This research question was presented earlier in the document as a hypothesis.

10.12.2 Data analyses of frequency and duration data of alarm list versus alarm tile

The descriptive statistics and ANOVA analyses were carried out to explore the research questions on the use of alarm list and alarm tile.

10.12.2.1 Descriptive statistics of alarm list and alarm tile

10.12.2.1.1 Descriptive statistics of frequency data of alarm list and alarm tile

The descriptive analysis of the visual activity of the crews has been carried out for the frequency data in every scenario, see Table 10-126. The mean (average percentage) of the number of visual accesses to the alarm system in three scenarios is 5.54%. The mean number of visual accesses to the alarm list⁶⁷ is 3.33%, and to the alarm tile is 2.23%.

Table 10-126. *Descriptive Statistics of Crews for Frequency Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios*

Frequency in scenario ⁶⁸	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm List	1.33	7.63	3.06	1.74	1.75
	Alarm Tile	0.59	3.37	1.99	0.94	0.16
Scenario 2	Alarm List	1.04	7.26	3.74	1.88	0.59
	Alarm Tile	0.81	4.53	2.43	1.23	0.33
Scenario 3	Alarm List	0.85	7.48	3.18	1.88	0.95
	Alarm Tile	0.41	4.89	2.27	1.53	0.62

Considering the operator role, the descriptive statistics of six reactor operators and six turbine operators are presented in Tables 10-127 and 10-128, respectively.

⁶⁷ As explained earlier, the frequency data for the alarm list were estimated by taking into account sequentially the four AOIs of the alarm list.

Table 10-127. *Descriptive Statistics of Reactor Operators for Frequency Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios*

Frequency in scenario	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm List	1.74	7.63	3.41	2.17	1.98
	Alarm Tile	1.41	3.37	2.56	0.79	-0.77
Scenario 2	Alarm List	3.41	7.26	5.16	1.52	0.21
	Alarm Tile	2.07	4.53	3.38	0.89	-0.31
Scenario 3	Alarm List	1.59	7.48	4.15	1.98	0.77
	Alarm Tile	1.15	4.89	3.23	1.52	-0.40

The mean number of visual accesses of the reactor operators to the alarm system in three scenarios is 7.27%. The mean number of visual accesses to the alarm list is 4.24%, and to the alarm tile is 3.06%.

Table 10-128. *Descriptive Statistics of Turbine Operators for Frequency Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios*

Frequency in scenario	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm List	1.33	4.41	2.72	1.30	0.26
	Alarm Tile	0.59	2.70	1.41	0.72	1.24
Scenario 2	Alarm List	1.04	3.26	2.32	0.82	-0.54
	Alarm Tile	0.81	2.52	1.49	0.62	0.74
Scenario 3	Alarm List	0.85	4.11	2.22	1.27	0.69
	Alarm Tile	0.41	2.30	1.31	0.79	0.52

The mean number of visual accesses of the turbine operators to the alarm system in three scenarios is 3.82%. The mean number of visual accesses to the alarm list is 2.42% and to the alarm tile is 1.41%.

In summary, Figure 10-58 presents the distribution of the frequency data for the alarm system and for the two alarm displays in three scenarios. Further, these frequency data are shown, in Figure 10-59, distributed on the operator position.

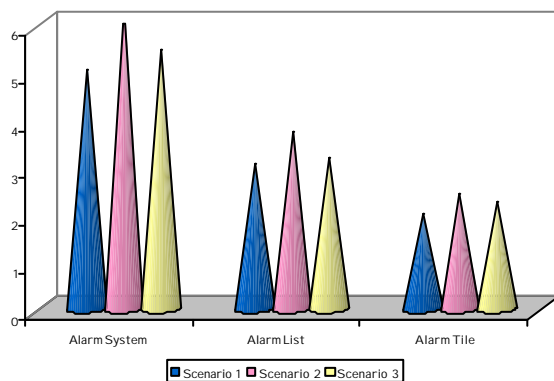


Figure 10-58. Frequency data of alarm system, alarm list and alarm tile by crew in three scenarios.

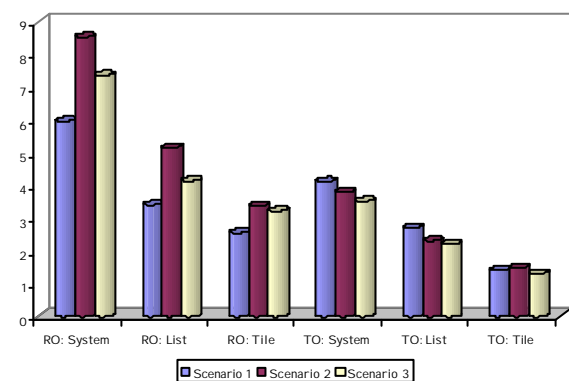


Figure 10-59. Frequency data of alarm system, alarm list and alarm tile by operator role in three scenarios.

Figures 10-58 and 10-59 lead to the conclusion of that the crews make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile. Beyond, the reactor operators contribute with a higher number of visual accesses than the turbine operators.

10.12.2.1.2 Descriptive statistics of duration data of alarm list and alarm tile

Descriptive analysis has been carried out for the duration data in each scenario, see results in Table 10-129. The mean time, averaged over all operators, gazing at the alarm system in three scenarios was 10.01%, divided in 7.46% at the alarm list, and 2.55% at the alarm tile. The alarm list varies from a mean of 6.91% to 8.37%, and from a minimum of 2.11% to a maximum of 16.1%. The alarm tile oscillates between a mean of 2.71% to 2.34%, and from a minimum of 0.56% to a maximum of 5.42%.

Table 10-129. *Descriptive Statistics of Crew Duration Data on Alarm List versus Alarm Tile in Three Scenarios*

Duration in scenario	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm List	4.18	16.11	7.11	3.37	1.89
	Alarm Tile	1.05	4.57	2.59	1.14	0.41
Scenario 2	Alarm List	2.11	12.58	8.37	3.25	-0.25
	Alarm Tile	0.69	5.42	2.71	1.34	0.38
Scenario 3	Alarm List	2.33	12.96	6.91	3.48	0.45
	Alarm Tile	0.56	4.87	2.34	1.42	0.78

Moreover, the alarm data are explored based on the operator role. Tables 10-130 and 10-131 present the descriptive data of six reactor operators and six turbine operators, respectively.

Table 10-130. *Descriptive Statistics of the Reactor Operators for Duration Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios*

Duration in scenario	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm List	4.18	16.11	8.12	4.55	1.21
	Alarm Tile	2.38	4.57	3.46	0.87	-0.23
Scenario 2	Alarm List	7.84	12.58	10.87	1.94	-0.68
	Alarm Tile	2.36	5.42	3.67	1.06	0.71
Scenario 3	Alarm List	3.38	12.96	8.99	3.49	-0.77
	Alarm Tile	2.00	4.87	3.35	1.26	0.26

The mean time of the reactor operators gazing at the alarm system in three scenarios is 12.82%, distributed in 9.33% to the alarm list, and 3.49% to the alarm tile.

Table 10-131. *Descriptive Statistics of the Turbine Operators for Duration Data of Alarm List and Tile in Three Scenarios*

Duration in scenario	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm List	4.35	7.53	6.11	1.34	-0.35
	Alarm Tile	1.05	2.47	1.73	0.54	-0.10
Scenario 2	Alarm List	2.11	8.31	5.87	2.12	-1.13
	Alarm Tile	0.69	2.72	1.76	0.81	-0.50
Scenario 3	Alarm List	2.33	8.42	4.84	2.02	1.09
	Alarm Tile	0.56	2.18	1.32	0.61	0.30

The mean time of the turbine operators gazing at the alarm system in three scenarios is 7.21%, with a mean of visual accesses to the alarm list of 5.61%, and 1.60% to the alarm tile.

As a summary, Figure 10-60 presents the distribution of duration data for the alarm system, and the two alarm displays. In Figure 10-61, the percentage of time spent on the alarm AOIs is distributed considering the operator role.

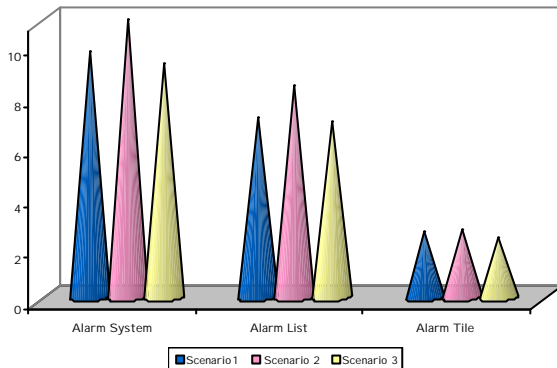


Figure 10-60. Duration data of alarm system, alarm list and alarm tile in three scenarios.

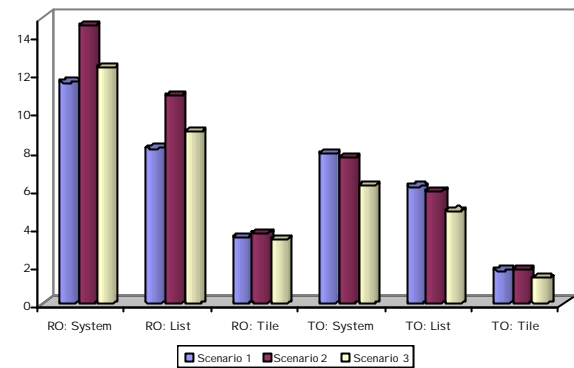


Figure 10-61. Duration data of alarm system, alarm list and alarm tile by operator role.

The crew spent a larger percentage of time monitoring the alarm list than of the alarm tile. Further, the reactor operators contribute with a longer time looking at the alarm system.

10.12.2.2 ANOVA analyses of the number of visual accesses to two alarm areas of interest

The ANOVA analyses of the number of visual accesses to two alarm AOIs have been carried out during the total scenario time and for the predefined scenario periods (see 10.3.2.2 for a description of the scenario periods). The ANOVA repeated measures, within scenario designs, a fixed factors model (2x2), explored the possible interaction effects between the alarm system screens (alarm list versus alarm tile), and the operator position (reactor operator versus turbine operator) in each scenario. The *p*-value, the power and the effect size are presented related to the statistically significant results and a tendency to an effect.

10.12.2.2.1 ANOVA analyses of frequency data of two alarm areas of interest for total scenario time

The number of visual accesses to the alarm list and the alarm tile was analyzed with the ANOVA repeated measures in every scenario. The results are described in the following.

10.12.2.2.1.1 Number of visual accesses to alarm list and to alarm tile in scenario 1

The results of ANOVA, repeated measures, for analyzing the effects of alarm system displays, of the operator role, and the interaction effects in the number of fixations in the scenario 1 are shown in Tables 10-132, 10-133 and 10-134.

Table 10-132. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.99	0.48
Turbine Operator	2.07	0.48

Table 10-133. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 1

AOI	Mean	SD
Alarm List	3.06	0.52
Alarm Tile	1.99	0.22

Table 10-134. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 1

Alarm AOI (Frequency)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm List	RO	3.41	2.17	AOI:		
	TO	2.72	1.30	6.669 (1,10)	.027 ^(*)	List > Tile
	Total	3.06	1.74	Operator:		
Alarm Tile	RO	2.56	0.79	1.869 (1,10)	.202	
	TO	1.41	0.72	AOI by Operator:		
	Total	1.99	0.94	0.300 (1,10)	.596	
^(*) <i>p</i> < .05.	^(**) <i>p</i> < .01.	^(***) <i>p</i> < .001.	⁽⁺⁾ <i>p</i> < .10.			

A statistically significant effect of the alarm system indicates that the operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the tile in the scenario 1.

Figure 10-62 shows the means of the number of visual accesses to the alarm system displays, based on the operator position in the crew, in the scenario 1.

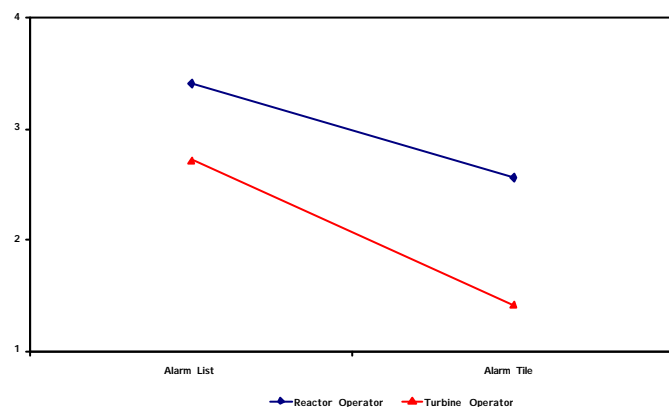


Figure 10-62. Means of frequency of alarm system displays by operator role in scenario 1.

10.12.2.2.1.2 Number of visual accesses to alarm list and to alarm tile in scenario 2

The results of ANOVA repeated measures for analyzing the effects of the alarm list versus the alarm tile, the effects of operator role, and the interaction effects in the number of fixations in the scenario 2 are shown in Tables 10-135, 10-136 and 10-137.

Table 10-135. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	4.27	0.37
Turbine Operator	1.90	0.37

Table 10-136. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 2

AOI	Mean	SD
Alarm List	3.74	0.35
Alarm Tile	2.43	0.22

Table 10-137. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 2

Alarm AOI (Frequency)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm List	RO	5.16	1.52	AOI:		
	TO	2.32	0.82	24.641 (1,10)	.001 ^(***)	List > Tile
	Total	3.74	1.88	Operator:		
Alarm Tile	RO	3.38	0.89	20.239 (1,10)	.001 ^(***)	RO > TO
	TO	1.49	0.62	AOI by Operator:		
	Total	2.43	1.23	3.218 (1,10)	.103 ⁽⁺⁾	List and RO
^(*) <i>p</i> < .05.		^(**) <i>p</i> < .01.		^(***) <i>p</i> < .001.		⁽⁺⁾ <i>p</i> < .10.

A statistically significant effect of the alarm system indicates that the operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile in the scenario 2.

A statistically significant operator effect shows that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm displays than the turbine operators.

A tendency to an effect of alarm AOIs by the operator role is revealed in the alarm list and the reactor operators. There is not an overlapping of the confidence intervals of the reactor and turbine operators with the alarm list neither with the alarm tile (see Table 10-138). However, there is a wider distance in the alarm list, and the reactor operators provide a higher score than the turbine operators to the alarm list (see Figure 10-63).

Table 10-138. *Alarm System (Alarm List – Alarm Tile) by Operator (Interaction) Effect in Scenario 2*

Operator	Alarm System display AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Alarm List	5.16	0.50	4.051	6.266
	Alarm Tile	3.38	0.31	2.679	4.077
Turbine Operator	Alarm List	2.32	0.50	1.214	3.429
	Alarm Tile	1.49	0.31	0.788	2.186

Figure 10-63 shows the means of the number of visual accesses to the alarm system screens in the scenario 2, considering the operator role.

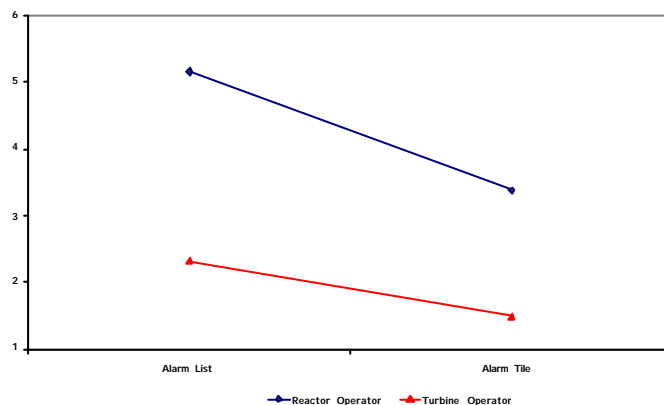


Figure 10-63. Means of frequency of alarm system displays by operator role in scenario 2.

10.12.2.2.1.3 Number of visual accesses to alarm list and to alarm tile in scenario 3

The results of ANOVA for analyzing the effects of the alarm list versus alarm tile, the operator role, and the interaction effects in the number of fixations in the scenario 3 are shown in Tables 10-139, 10-140 and 10-141.

Table 10-139. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	3.69	0.57
Turbine Operator	1.77	0.57

Table 10-140. *AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 3*

AOI	Mean	SD
Alarm List	3.18	0.48
Alarm Tile	2.27	0.35

Table 10-141. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 3

Alarm AOI (Frequency)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm List	RO	4.15	1.98	AOI:		
	TO	2.22	1.27	13.303 (1,10)	.004 ^(**)	List > Tile
	Total	3.18	1.88	Operator:		
Alarm Tile	RO	3.23	1.52	5.724 (1,10)	.038 ^(*)	RO > TO
	TO	1.31	0.79	AOI by Operator:		
	Total	2.27	1.53	0.001 (1,10)	.971	
^(*) p < .05.		^(**) p < .01.	^(***) p < .001.	⁽⁺⁾ p < .10.		

A statistically significant effect of alarm system points out that the operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the tile in the scenario 3.

A statistically significant operator effect indicates that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm AOIs than the turbine operators.

Figure 10-64 shows the means of the number of visual accesses to the alarm system displays in the scenario 3, taking into account the operator role.

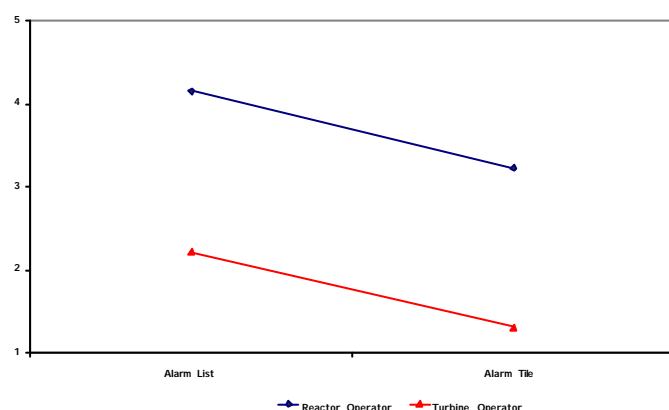


Figure 10-64. Means of frequency of alarm system displays by operator role in scenario 3.

10.12.2.2.1.4 Statistical power and effect size in the number of visual accesses to alarm system displays, operator role and their interactions

The statistical power and the effect size of the alarm system displays, the operator role and their interactions in the three scenarios are presented in Table 10-142.

Table 10-142. Power and Effect Size of 2 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Frequency)

AOIs in Scenario	AOI		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
AOIs in Scenario 1	.644	.400	.236	.157	.079	.029
AOIs in Scenario 2	.994	.711	.981	.669	.368	.243
AOIs in Scenario 3	.907	.571	.579	.364	.050	.000

10.12.2.2.1.5 Summary of results of amount of visual accesses to alarm list and alarm tile in three scenarios

A summary of statistically significant results related to the number of visual accesses to the two alarm system displays is included in Table 10-143:

- Statistically significant effects of alarm system in all three scenarios. The operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile.
- Statistically significant effects of operator position in the scenarios 2 and 3. The reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system displays than the turbine operators.
- The tendency to an interaction effect in the scenario 2 is explained by the alarm list and the reactor operators.

Table 10-143. *Main Results of Frequency Data of Alarm Displays*

Scenario	Alarm Display AOI Effect	Operator Effect	Interaction Effect
Scenario 1	List > Tile ($p = .027$)		
Scenario 2	List > Tile ($p = .001$)	RO > TO ($p = .001$)	Alarm list and RO ($p = .103$)
Scenario 3	List > Tile ($p = .004$)	RO > TO ($p = .038$)	

10.12.2.2.2 ANOVA analyses of frequency data of two alarm areas of interest for the scenario periods

The number of visual accesses to the alarm list and tile was explored with ANOVA repeated measures in all the scenario periods. The detailed ANOVA results are included in Appendix G.

10.12.2.2.2.1 ANOVA analyses of frequency data of 2 AOIs for 33 periods of scenario 1

A summary of statistically significant results of the ANOVA analysis of the number of visual accesses to the alarm list and the alarm tile, during 33 periods of the scenario 1, is described in Table 10-144. In 14 of 33 periods of the scenario 1 some effects happened, as follows:

- Statistically significant effects of the alarm system happen in 4 periods of the scenario 1, and also a tendency to an alarm system effect occurs in 4 periods. All results show that the operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile.
- Two statistically significant effects of the operator position are found in the scenario 1, and tendencies to an operator effect exist in 3 scenario periods. All results indicate that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system than the turbine operators.
- Two statistically significant interaction effects are found in the scenario 1, because of the alarm tile and the reactor operators.

Table 10-144. *Main Results of Frequency Data for 33 Periods of Scenario 1 in Two AOIs*

Scen 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
3	List > Tile ($p = .010$)	.811	.499						
5	List > Tile ($p = .003$)	.933	.597						
6	List > Tile ($p = .006$)	.876	.545						
7	List > Tile ($p = .032$)	.613	.383	RO > TO ($p = .080$)	.421	.275			
9				RO > TO ($p = .086$)	.406	.266			
13				RO > TO ($p = .029$)	.633	.394			
14							Tile and RO	.552	.349

Scen 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
15				RO > TO ($p = .096$)	.383	.253	($p = .043$)		
21	List > Tile ($p = .052$)	.512	.327						
23	List > Tile ($p = .094$)	.386	.254						
25	List > Tile ($p = .090$)	.396	.260						
26							Tile and RO ($p = .049$)	.524	.333
31				RO > TO ($p = .031$)	.621	.387			
32	List > Tile ($p = .060$)	.482	.310						

10.12.2.2.2 ANOVA analyses of frequency data of 2 AOIs for 30 periods of scenario 2

A summary of statistically significant results of the ANOVA analysis of the number of visual accesses to the alarm list and the tile, during 30 periods of the scenario 2, is described in Table 10-145. In 21 of 30 periods of the scenario 2 some effects happened, as follows:

- Statistically significant effects of alarm system occur in 9 periods of the scenario 2, while a tendency to an alarm system effect happens in 5 scenario periods. All results show that the operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile.
- Statistically significant operator effects exist in 11 periods, and a tendency to an operator effect is detected in 5 scenario periods. All results indicate that the reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system than the turbine operators.
- Statistically significant interaction effects are found in 4 periods, and also one tendency to an interaction effect. All five interactions are because of the alarm list and reactor operators.

Table 10-145. *Main Results of Frequency Data for 30 Periods of Scenario 2 in Two AOIs*

Scen 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
4	List > Tile ($p = .083$)	.415	.271	RO > TO ($p = .010$)	.817	.503			
5	List > Tile ($p = .059$)	.487	.313	RO > TO ($p = .049$)	.524	.333	List and RO ($p = .016$)	.746	.458
8	List > Tile ($p = .001$)	.976	.659						
9	List > Tile ($p = .029$)	.630	.392	RO > TO ($p = .040$)	.570	.359			
11	List > Tile ($p = .052$)	.513	.327						
12				RO > TO ($p = .057$)	.495	.317			
14				RO > TO ($p = .060$)	.482	.310			
15				RO > TO ($p = .023$)	.675	.417			
16	List > Tile ($p = .044$)	.547	.346	RO > TO ($p = .019$)	.709	.437	List and RO ($p = .003$)	.931	.595
17	List > Tile ($p = .011$)	.805	.495	RO > TO ($p = .036$)	.591	.370			

Scen 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
18	List > Tile ($p = .040$)	.568	.358	RO > TO ($p = .014$)	.764	.469			
19	List > Tile ($p = .012$)	.784	.482	RO > TO ($p = .072$)	.443	.288	List and RO ($p = .049$)	.524	.333
21				RO > TO ($p = .051$)	.515	.329			
22				RO > TO ($p = .014$)	.769	.472	List and RO ($p = .031$)	.621	.387
23				RO > TO ($p = .013$)	.770	.473			
24							List and RO ($p = .073$)	.441	.287
26	List > Tile ($p = .019$)	.712	.438	RO > TO ($p = .001$)	.993	.707			
27	List > Tile ($p = .029$)	.636	.395						
28	List > Tile ($p = .071$)	.447	.290	RO > TO ($p = .002$)	.950	.616			
29	List > Tile ($p = .051$)	.518	.330	RO > TO ($p = .087$)	.405	.265			
30	List > Tile ($p = .006$)	.874	.543						

10.12.2.2.2.3 ANOVA analyses of frequency data of 2 AOIs for 31 periods of scenario 3

A summary of statistically significant results of the ANOVA analysis of the number of visual accesses to the alarm list and alarm tile displays, during 31 periods of the scenario 3, is described in Table 10-146. In 17 of 31 periods of the scenario 3 some effects happened, as follows:

- Statistically significant effects of the alarm system occur in 5 periods of the scenario 3, and there is a tendency to an alarm system effect in 2 scenario periods. All results show that the operators make a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile.
- Statistically significant operator effects are found in 7 periods, and tendency to an operator effect happens in 3 scenario periods. All results indicate that the reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm system than the turbine operators.
- A total of 3 significant interaction effects exist, which are explained by the alarm tile and the reactor operators, the alarm list and the turbine operators, and the alarm list and the reactor operators.

Table 10-146. *Main Results of Frequency Data for 31 Periods of Scenario 3*

Scen 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
2	List > Tile ($p < .001$)	.999	.761						
5	List > Tile ($p = .002$)	.969	.646						
6							Tile and RO ($p = .028$)	.639	.397
7	List > Tile ($p = .097$)	.381	.251				List and TO ($p = .040$)	.566	.357
8				RO > TO ($p = .036$)	.592	.371			
12				RO > TO ($p = .031$)	.621	.387			

Scen 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
15	List > Tile ($p = .031$)	.622	.388						
18				RO > TO ($p = .014$)	.765	.470			
21	List > Tile ($p = .065$)	.465	.300						
22				RO > TO ($p = .086$)	.406	.266			
23				RO > TO ($p = .074$)	.438	.285			
25	List > Tile ($p = .032$)	.613	.383						
26				RO > TO ($p = .013$)	.775	.476	List and RO ($p = .017$)	.736	.453
28				RO > TO ($p = .083$)	.414	.271			
29				RO > TO ($p = .014$)	.769	.472			
30				RO > TO ($p = .012$)	.787	.484			
31	List > Tile ($p = .024$)	.670	.414	RO > TO ($p = .040$)	.565	.356			

10.12.2.2.2.4 Summary of results of frequency data of two alarm areas of interest during scenario periods

In the scenarios 1, 2 and 3, there is some effect (alarm screen type, operator position or interaction) of the number of visual accesses accounting for the amount of 14, 21 and 17 scenario periods, respectively. Operators gazed more times at the alarm list than the alarm tile. The reactor operators present a higher number of visual accesses to the alarm system than the turbine operators. Some interaction effects occurred; however, not all results were in the same direction. The interactions in the frequency data are caused by the alarm tile and the reactor operators in the scenario 1, by the alarm list and the reactor operators in the scenario 2, and different combinations in the scenario 3.

10.12.2.3 ANOVA analyses of the percentage of time gazing at two alarm areas of interest

ANOVA analysis of the duration of the visual accesses to two alarm AOIs has been carried out during the total scenario time and for predefined scenario periods (see 10.3.2.2 for a description of the scenario periods). ANOVA repeated measures, within scenario designs, a fixed factors model (2x2), explored the possible interaction effects between the alarm system displays (alarm list versus alarm tile), and the operator position (reactor versus turbine).

10.12.2.3.1 ANOVA analyses of duration data of two alarm areas of interest for total scenario time

The proportion of time gazing at the alarm list and tile was analyzed with the ANOVA technique in each scenario. The main results of the duration data are described separately for every scenario.

10.12.2.3.1.1 Percentage of time gazing at alarm list and alarm tile in scenario 1

The results of ANOVA for analyzing the effects of the duration of the visual accesses to the alarm list versus alarm tile, the effects of operator role, and the interaction effects in the scenario 1 are shown in Tables 10-147, 10-148 and 10-149.

Table 10-147. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	5.79	0.61
Turbine Operator	3.92	0.61

Table 10-148. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 1

AOI	Mean	SD
Alarm List	7.11	0.97
Alarm Tile	2.59	0.21

Table 10-149. Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 1

Alarm AOI (duration)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm List	RO	8.12	4.55	AOI:	16.865 (1,10) .002 ^(**)	List > Tile
	TO	6.11	1.34			
	Total	7.11	3.37	Operator:		
Alarm Tile	RO	3.46	0.87	4.669 (1,10)	.056 ⁽⁺⁾	RO > TO
	TO	1.73	0.54	AOI by Operator:	0.017 (1,10) .900	
	Total	2.59	1.14			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant alarm system effect shows that the operators make a longer use of the alarm list than of the alarm tile in the scenario 1.

There is a tendency of an operator effect, indicating that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the AOIs of the alarm system displays than the turbine operators.

Figure 10-65 shows the means of the percentage of time gazing at the alarm system displays, based on the operator role, in the scenario 1.

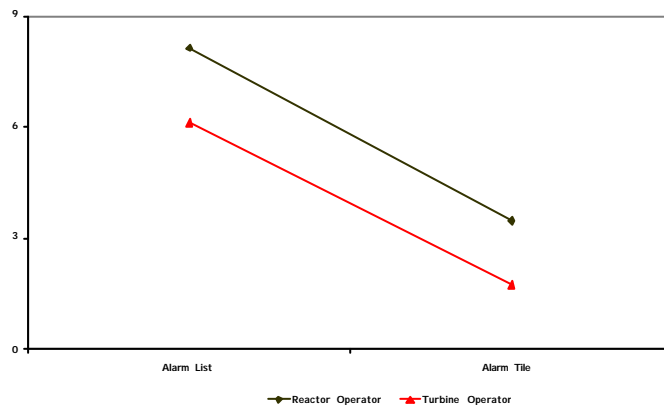


Figure 10-65. Means of duration of alarm system displays by operator role in scenario 1.

10.12.2.3.1.2 Percentage of time gazing at alarm list and at alarm tile in scenario 2

The results of ANOVA, repeated measures, for analyzing the effects of the proportion of time spent in the alarm list versus tile, the effects of the operator role, and their interaction in the scenario 2 are shown in Tables 10-150, 10-151 and 10-152.

Table 10-150. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	7.27	0.51
Turbine Operator	3.81	0.51

Table 10-151. *AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 2*

AOI	Mean	SD
Alarm List	8.37	0.59
Alarm Tile	2.71	0.27

Table 10-152. *Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 2*

Alarm AOI (duration)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm List	RO	10.87	1.94	AOI:		
	TO	5.87	2.12	98.374 (1,10)	.000 ^(***)	List > Tile
	Total	8.37	3.25	Operator:		
Alarm Tile	RO	3.67	1.06	23.333 (1,10)	.001 ^(***)	RO > TO
	TO	1.76	0.81	AOI by Operator:		
	Total	2.71	1.34	7.375 (1,10)	.022 ^(*)	List and RO
^(*) p < .05.	^(**) p < .01.	^(***) p < .001.	⁽⁺⁾ p < .10.			

^(*) $p < .05$.^(**) $p < .01$.^(***) $p < .001$.⁽⁺⁾ $p < .10$.

A highly statistically significant effect of the alarm system AOIs shows that the operators make a longer use of the alarm list than of tile in the scenario 2.

A statistically significant effect indicates that the reactor operators allocated more time at the AOIs of the alarm system displays than the turbine operators.

There is a statistically significant interaction effect. There is not an overlapping of the confidence intervals of the reactor and turbine operators with the alarm system display AOIs (see Table 10-153), but there is a wider distance in the alarm list (see Figure 10-66). In the post hoc tests, the results of the contrast in the alarm list is significant ($t=3.581$, with a required value for Student's t distribution of $t_{(0.025,10)}= 2.22814$). Therefore, the interaction effect is found in the alarm list and the reactor operators.

Table 10-153. *Alarm System (Alarm List – Alarm Tile) by Operator (Interaction) Effect in Scenario 2*

Operator	Alarm System Type AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Alarm List	10.87	0.83	9.021	12.722
	Alarm Tile	3.67	0.38	2.812	4.524
Turbine Operator	Alarm List	5.87	0.83	4.016	7.717
	Alarm Tile	1.76	0.38	0.904	2.616

Figure 10-66 shows the means of the percentage of time gazing at the alarm system displays in the scenario 2, considering the operator role.

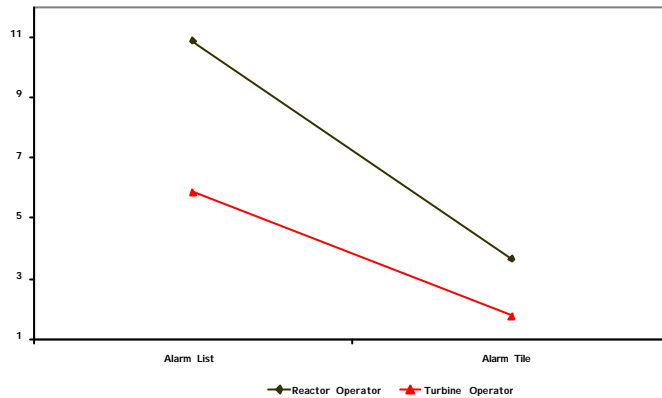


Figure 10-66. Means of duration of alarm system displays by operator role in scenario 2.

10.12.2.3.1.3 Percentage of time gazing at alarm list and at alarm tile in scenario 3

The results of ANOVA, repeated measures, for analyzing the effects of duration of the visual accesses to the alarm list versus tile, the effects of operator role, and their interaction in the scenario 3 are shown in Tables 10-154, 10-155 and 10-156.

Table 10-154. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	6.17	0.70
Turbine Operator	3.08	0.70

Table 10-155. *AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 3*

AOI	Mean	SD
Alarm List	6.91	0.82
Alarm Tile	2.34	0.28

Table 10-156. *Means and SD of Alarm List and Alarm Tile by Operator Role in Scenario 3*

Alarm AOI (duration)	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm List	RO	8.99	3.49	39.294 (1,10)	.000 ^(***)	List > Tile
	TO	4.84	2.02			
	Total	6.91	3.48			
Alarm Tile	RO	3.35	1.26	9.674 (1,10)	.011 ^(*)	RO > TO
	TO	1.32	0.61			
	Total	2.34	1.42			
				AOI by Operator:	2.116 (1,10)	.176

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A highly statistically significant effect of the alarm system screens shows that the operators make a longer use of the alarm list than of tile.

A statistically significant operator effect indicates that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the AOIs of the alarm system displays than the turbine operators.

Figure 10-67 presents the mean of percentage of time gazing at the alarm system displays in the scenario 3, based on the operator role.

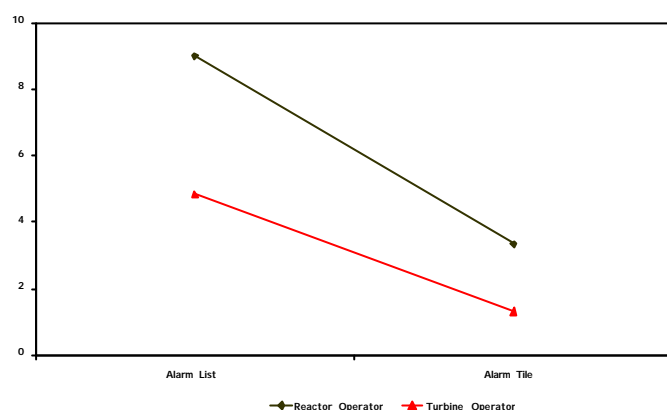


Figure 10-67. Means of duration of alarm system displays by operator role in scenario 3.

10.12.2.3.1.4 Statistical power and effect size in the amount of time monitoring at alarm system displays, operator role and interactions

The statistical power and the effect size of the alarm list versus the alarm tile, of the operator role, and their interactions for three scenarios are presented in Table 10-157.

Table 10-157. Power and Effect Size of 2 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Duration)

AOIs in scenario	AOI		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
AOIs in Scenario 1	.958	.628	.497	.318	.052	.002
AOIs in Scenario 2	.999	.908	.991	.700	.688	.424
AOIs in Scenario 3	.999	.797	.800	.492	.261	.175

10.12.2.3.1.5 Summary of results of percentage of time gazing at alarm list and tile in three scenarios

The main results of the percentage of time gazing at the alarm system displays are included in Table 10-158:

- Statistically significant effects between the alarm list and the alarm tile in all three scenarios shows that the operators make a longer use of the alarm list than of the tile.
- Statistically significant effects of operator position were found in the scenarios 2 and 3, and a tendency in the scenario 1. The reactor operators spent a larger proportion of time monitoring the AOIs of alarm system displays than the turbine operators.
- A statistically significant interaction effect happened in the scenario 2, which was found in the alarm list and the reactor operators according to the significant results of the contrasts with the post hoc Student's t tests.

Table 10-158. Main Results of Duration Data of Alarm Displays

Scenarios	Alarm Display AOI Effect	Operator Effect	Interaction Effect
Scenario 1	List > Tile ($p = .002$)	RO > TO ($p = .056$)	
Scenario 2	List > Tile ($p < .001$)	RO > TO ($p = .001$)	Alarm list and RO ($p = .022$)
Scenario 3	List > Tile ($p < .001$)	RO > TO ($p = .011$)	

10.12.2.3.2 ANOVA analyses of duration data of two alarm areas of interest for the scenario periods

The percentage of time looking at the alarm list and tile was explored with ANOVA, repeated measures, in all scenario periods. The detailed ANOVA results are included in Appendix G.

10.12.2.3.2.1 ANOVA analyses of duration data of two AOIs for 33 periods of scenario 1

A summary of statistically significant results of the ANOVA analysis of the amount of time gazing at the alarm list and tile displays, during 33 periods of the scenario 1, is described in Table 10-159. In 22 of 33 periods of the scenario 1 some effects happened:

- Statistically significant effects of the alarm system happen in 10 periods of the scenario 1, and also a tendency is found in 10 periods. The operators make a larger use of the alarm list than of the alarm tile.
- Statistically significant effects of the operator position occur in 2 periods, while a tendency to an operator effect exists in 3 periods. All results indicate that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators.
- There is not found any interaction effect in the scenario 1.

Table 10-159. Main Results of Duration Data of Alarm Displays for 33 Periods of Scenario 1

Scen 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
4	List > Tile ($p = .018$)	.725	.446						
5	List > Tile ($p < .001$)	.999	.816						
6	List > Tile ($p < .001$)	.998	.748	RO > TO ($p = .027$)	.645	.400			
7	List > Tile ($p = .005$)	.903	.568						
8	List > Tile ($p = .039$)	.630	.392						
9	List > Tile ($p = .086$)	.406	.266						
10				RO > TO ($p = .086$)	.407	.267			
12	List > Tile ($p = .097$)	.380	.250						
13				RO > TO ($p = .063$)	.472	.304			
17	List > Tile ($p = .023$)	.677	.418						
19	List > Tile ($p = .053$)	.507	.324						
20	List > Tile ($p = .037$)	.583	.366						
21	List > Tile ($p = .067$)	.458	.296						
22	List > Tile ($p = .086$)	.407	.267						
23	List > Tile ($p = .007$)	.863	.535						
27	List > Tile ($p = .053$)	.510	.326						
28	List > Tile	.491	.315						

Scen 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
29	($p = .058$) List > Tile	.508	.325						
30	($p = .053$) List > Tile	.524	.334						
31	($p = .049$) List > Tile	.465	.300	RO > TO ($p = .040$)	.567	.357			
32	($p = .065$) List > Tile	.434	.282						
33	($p = .075$) List > Tile	.564	.356	RO > TO ($p = .053$)	.507	.324			
	($p = .041$)								

10.12.2.3.2.2 ANOVA analyses of duration data of 2 AOIs for 30 periods of scenario 2

A summary of statistically significant results of the ANOVA analysis of the percentage of time gazing at the alarm list and tile, during 30 periods of the scenario 2, is described in Table 10-160. In 24 of 30 periods of the scenario 2 some effects happened:

- Statistically significant effects of the alarm system are found in 12 periods of the scenario 2, and a tendency to an effect is observed in 8 periods. The operators make a larger use of the alarm list than of the alarm tile.
- Statistically significant effects of the operator position are in 6 periods, and a tendency to an operator effect exists in 4 scenario periods. In all cases, the reactor operators spent a larger proportion of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators.
- Statistically significant interaction effects happen in 2 periods, and tendency to an interaction effect is found in 3 scenario periods. All the interaction effects are on the alarm list and the reactor operators.

Table 10-160. *Main Results of Duration Data of Alarm Displays for 30 Periods of Scenario 2*

Scen 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
4	List > Tile ($p = .005$)	.902	.567	RO > TO ($p < .001$)	.999	.829	List and RO ($p = .009$)	.825	.508
5	List > Tile ($p = .053$)	.509	.325	RO > TO ($p = .075$)	.434	.283	List and RO ($p = .098$)	.379	.250
7				RO > TO ($p = .067$)	.458	.296			
8	List > Tile ($p < .001$)	.999	.831						
9	List > Tile ($p = .002$)	.959	.629						
10	List > Tile ($p = .064$)	.470	.303						
11	List > Tile ($p = .017$)	.733	.451	RO > TO ($p = .097$)	.381	.251			
12	List > Tile ($p = .053$)	.509	.325						
13	List > Tile ($p = .001$)	.976	.657				List and RO ($p = .002$)	.971	.649
14	List > Tile ($p = .075$)	.436	.284						
16	List > Tile ($p = .060$)	.484	.311						
17	List > Tile	.676	.418	RO > TO	.517	.329			

Scen 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
18	($p = .023$) List > Tile	.714	.440	($p = .051$) RO > TO	.706	.435	List and RO ($p = .081$)	.418	.273
19	($p = .019$) List > Tile	.459	.297	($p = .020$) RO > TO					
21	($p = .067$) List > Tile			($p = .043$) RO > TO	.555	.351			
22	($p = .060$) List > Tile	.483	.310	($p = .019$) RO > TO	.711	.438			
23									
24							List and RO ($p = .069$)	.452	.293
25	List > Tile ($p = .082$)	.417	.272						
26	List > Tile ($p = .009$)	.830	.511	RO > TO ($p = .039$)	.575	.362			
27	List > Tile ($p = .016$)	.746	.458						
28	List > Tile ($p < .001$)	.996	.730	RO > TO ($p = .008$)	.840	.518			
29	List > Tile ($p = .005$)	.895	.561						
30	List > Tile ($p = .001$)	.986	.681						

10.12.2.3.2.3 ANOVA analyses of duration data of 2 AOIs for 31 periods of scenario 3

A summary of statistically significant results of the ANOVA analysis of the amount of time gazing at the alarm list and tile, during 31 periods of the scenario 3, is described in Table 10-161. In 24 of 31 periods of the scenario 3 some effects happened:

- Statistically significant effects of the alarm system are observed in 10 periods of the scenario 3, and also tendency to an alarm system effect exists in 7 periods. All results indicate that the operators make a larger use of the alarm list than of the alarm tile.
- Statistically significant effects of the operator position are in 5 periods, and tendency to an operator effect happens in 5 periods too. The reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators.
- Statistically significant interaction effects are detected in 2 periods, which are explained by the alarm list and the reactor operators. Tendency to an interaction effect happens in 5 periods: the alarm list and the reactor operators in 3 periods (the scenario periods 18, 20 and 23), the alarm list and the turbine operators in period 2, and the alarm tile and the turbine operators in the period 17.

Table 10-161. *Main Results of Duration Data of Alarm Displays for 31 Periods of Scenario 3*

Scen 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
2	List > Tile ($p = .001$)	.977	.660				List and TO ($p = .091$)	.395	.259
5	List > Tile ($p = .002$)	.966	.640						
6				RO > TO ($p = .095$)	.385	.254			

Scen 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
7	List > Tile ($p = .020$)	.701	.432						
8				RO > TO ($p = .083$)	.414	.271			
11	List > Tile ($p = .092$)	.392	.258						
12				RO > TO ($p = .079$)	.425	.277			
13				RO > TO ($p = .033$)	.609	.381			
14	List > Tile ($p = .034$)	.603	.377						
15	List > Tile ($p = .002$)	.958	.628						
16	List > Tile ($p = .028$)	.639	.397						
17							Tile and TO ($p = .092$)	.393	.258
18	List > Tile ($p = .093$)	.390	.256	RO > TO ($p = .054$)	.503	.322	List and RO ($p = .093$)	.390	.256
20	List > Tile ($p = .011$)	.800	.492				List and RO ($p = .081$)	.420	.274
21	List > Tile ($p = .061$)	.478	.308						
22				RO > TO ($p = .085$)	.409	.268			
23							List and RO ($p = .074$)	.438	.285
24	List > Tile ($p = .056$)	.496	.318						
25	List > Tile ($p = .012$)	.793	.487						
26	List > Tile ($p = .057$)	.494	.317	RO > TO ($p = .004$)	.926	.590	List and RO ($p = .020$)	.706	.435
27	List > Tile ($p = .067$)	.458	.296						
29	List > Tile ($p = .060$)	.483	.310	RO > TO ($p = .034$)	.602	.377			
30	List > Tile ($p = .004$)	.920	.584	RO > TO ($p = .004$)	.922	.585	List and RO ($p = .033$)	.605	.378
31	List > Tile ($p = .004$)	.923	.587	RO > TO ($p = .044$)	.547	.346			

10.12.2.3.2.4 Summary of results of duration data of two alarm areas of interest during scenario periods

In the scenarios 1, 2 and 3, there is some effect (alarm screen type, operator position or interaction) of the proportion of time in 22, 24 and 24 scenario periods, respectively. The operators use a longer time the alarm list than the alarm tile. The reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators. Some interaction effects occurred, most of them are explained by the alarm list and the reactor operators; however, no effect was found in the scenario 1.

10.12.2.4 ANOVA analyses of the number of visual accesses to five alarm areas of interest

Significant results of the alarm list in comparison with the alarm tile were reached. In this study, the alarm list AOI also consist of four AOIs; therefore, a further research question focused on exploring the weights of five alarm AOIs: alarm tile, and four AOIs of alarm list (alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of alarm list). Additional ANOVA tests for five alarm AOIs are carried out during the total scenario time and the scenario periods.

10.12.2.4.1 ANOVA analyses of frequency data of five alarm areas of interest for total scenario time

The number of visual accesses to five alarm AOIs, the alarm message content of the alarm list (alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of alarm list) and the alarm tile, was analyzed with the ANOVA technique, repeated measures, and a fixed factors model in each scenario.

10.12.2.4.1.1 Number of visual accesses to 5 alarm AOIs in scenario 1

The results of ANOVA on the effects of five alarm AOIs, the operator role, and the interaction effects for frequency data in the scenario 1 are in Tables 10-162, 10-163 and 10-164.

Table 10-162. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	1.79	0.29
Turbine Operator	1.42	0.29

Table 10-163. *AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 1*

Alarm AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.48	0.19
Alarm Text	3.25	0.62
Alarm Value	0.89	0.23
Other parts of List	0.42	0.07
Alarm Tile	1.99	0.22

Table 10-164. *Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 1*

Alarm AOI	Operator	Mean	SD	F (df). AOI. Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	RO	1.57	0.73	AOI: 15.140 (1.973,19.731)	.000 ^(***)	Tag > Others
	TO	1.38	0.61			Text > Value,
	Total	1.48	0.65			Others
Alarm Text	RO	3.31	2.61	Operator: 0.829 (1,10)	.384	Tile > Value,
	TO	3.19	1.52			Others
	Total	3.25	2.04			
Alarm Value	RO	0.90	0.93	AOI by Operator: 0.652 (1.973,19.731)	.530	
	TO	0.88	0.63			
	Total	0.89	0.76			
Other Parts of Alarm List	RO	0.60	0.26			
	TO	0.24	0.21			
	Total	0.42	0.30			
Alarm Tile	RO	2.56	0.79			
	TO	1.41	0.72			
	Total	1.99	0.94			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

Highly statistically significant effects of alarm system exist between some of the five alarm AOIs. The operators look at more frequently the alarm tile than the alarm value, and the time and other parts of alarm list. Also, the operators make a higher number of visual accesses to:

- Alarm tag than to time and other parts of the alarm list.
- Alarm message text than to alarm value, and time and other parts of alarm list.

The operator effect was similar across scenarios, since that statistically significant interaction effect not happened.

Figure 10-68 presents the means of the number of visual accesses to five AOIs of the alarm system in the scenario 1, considering the operator role.

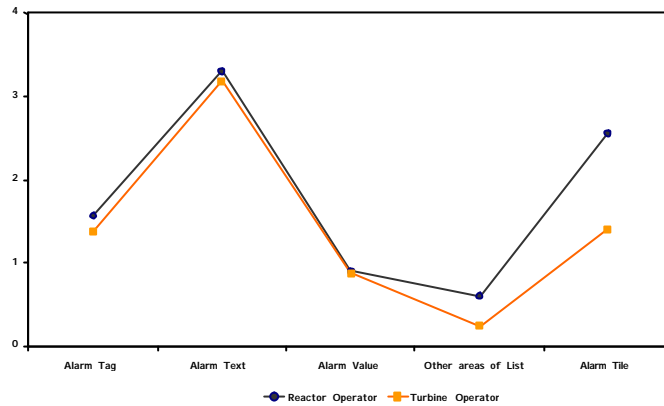


Figure 10-68. Means of frequency of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 1.

10.12.2.4.1.2 Number of visual accesses to 5 alarm AOIs in scenario 2

The results of ANOVA, repeated measures, for analyzing the effects of five alarm AOIs, the operator role, and the interaction effects for the number of visual accesses in the scenario 2 are shown in Tables 10-165, 10-166 and 10-167.

Table 10-165. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.67	0.20
Turbine Operator	1.35	0.20

Table 10-166. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 2

Alarm AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.73	0.32
Alarm Text	3.61	0.46
Alarm Value	1.08	0.18
Other parts of List	1.19	0.12
Alarm Tile	2.43	0.22

Table 10-167. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 2

Alarm AOI	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	RO	2.23	1.47	14.114 (3.194,31.936)	.000 ^(***)	Text > Tag, Value, Others
	TO	1.22	0.57			
	Total	1.73	1.19			
Alarm Text	RO	4.51	2.07	21.463 (1,10)	.001 ^(***)	Tile > Value, Others
	TO	2.70	0.88			
	Total	3.61	1.79			
Alarm Value	RO	1.28	0.76	1.230 (3.194,31.936)	.316	RO > TO
	TO	0.87	0.47			
	Total	1.08	0.64			
Other Parts of Alarm List	RO	1.94	0.50			
	TO	0.44	0.27			
	Total	1.19	0.87			
Alarm Tile	RO	3.38	0.89			
	TO	1.49	0.62			
	Total	2.43	1.23			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

Highly statistically significant effects of the alarm system between some of the five alarm AOIs were:

- The operators make a higher number of visual accesses to alarm message text than to the rest of the alarm list AOIs (alarm tag, alarm value, and time and other parts of the list).
- The operators look at more frequently the alarm tile than the alarm value, and time and other parts of the alarm list.

A statistically significant effect of the operator position states that the reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm AOIs than the turbine operators.

Figure 10-69 exhibits the means of the number of visual accesses to five AOIs of alarm system, considering the operator role, in the scenario 2.

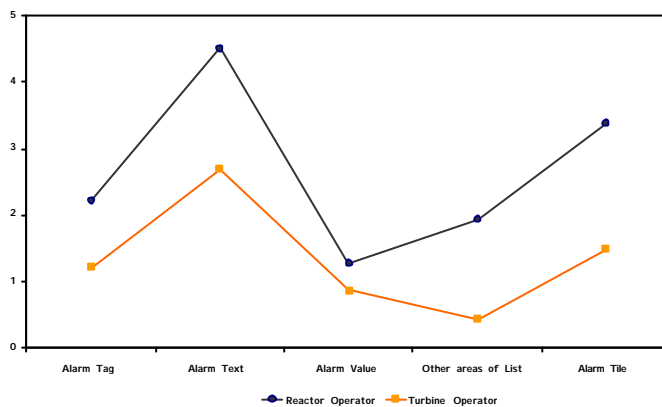


Figure 10-69. Means of frequency of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 2.

10.12.2.4.1.3 Number of visual accesses to 5 alarm AOIs in scenario 3

The results of ANOVA, repeated measures, on the effects of five alarm AOIs, the operator role, and the interaction effects of the number of visual accesses in the scenario 3 are presented in Tables 10-168, 10-169 and 10-170.

Table 10-168. Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.48	0.38
Turbine Operator	1.17	0.38

Table 10-169. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 3

Alarm AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.83	0.29
Alarm Text	3.18	0.56
Alarm Value	1.11	0.26
Other parts of List	0.72	0.11
Alarm Tile	2.27	0.35

Table 10-170. Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 3

Alarm AOI	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	RO	2.50	1.25	AOI: 15.748 (2,786,27,861)	.000 ^(***)	Tag > Value, Others Text > Tag, Value, Others Tile > Others
	TO	1.16	0.67			
	Total	1.83	1.18			
Alarm Text	RO	4.14	2.36	Operator: 5.882 (1,10)	.036 ^(*)	RO > TO
	TO	2.22	1.38			
	Total	3.18	2.10			
Alarm Value	RO	1.43	1.11	AOI by Operator: 1.660 (2,786,27,861)	.201	
	TO	0.80	0.64			
	Total	1.11	0.92			
Other Parts of Alarm List	RO	1.06	0.43			
	TO	0.38	0.36			
	Total	0.72	0.52			
Alarm Tile	RO	3.23	1.52			
	TO	1.31	0.79			
	Total	2.27	1.53			

(*) $p < .05$.(**) $p < .01$.(***) $p < .001$.(+) $p < .10$.

Highly statistically significant effects between some of the five alarm AOIs indicate that:

- The operators make a higher number of visual accesses to the alarm tag than to the alarm value, and to time and other parts of the alarm list.
- The operators make a higher number of visual accesses to the alarm text than to the rest of the AOIs of the alarm list (alarm tag, alarm value, and time and other parts of alarm list).
- The operators look at more frequently the alarm tile than the time and other parts of the alarm list.

A statistically significant effect of the operator position points out that the reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm AOIs than the turbine operators.

Figure 10-70 shows the means of the number of visual accesses to five AOIs of the alarm system, considering the operator role, in the scenario 3.

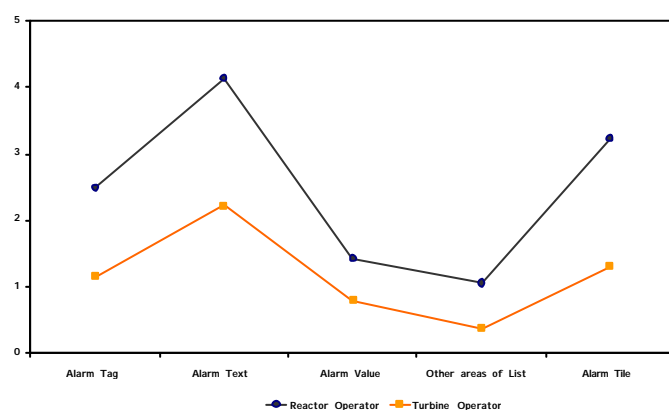


Figure 10-70. Means of frequency of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 3.

10.12.2.4.1.4 Statistical power and effect size in the number of visual accesses to five alarm system AOIs, operator role and their interactions

The statistical power and the effect size of five AOIs of the alarm system, the operator role, and their interactions for the number of visual accesses in three scenarios are presented in Table 10-171.

Table 10-171. *Power and Effect Size of 5 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Frequency)*

Area of Interest	AOI		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
AOIs in Scenario 1	.997	.602	.131	.077	.143	.061
AOIs in Scenario 2	.999	.585	.986	.682	.306	.109
AOIs in Scenario 3	.999	.612	.591	.379	.370	.142

10.12.2.4.1.5 Summary of results of number of visual accesses to alarm AOIs in three scenarios

Statistically significant effects between some of the five alarm AOIs occur in all scenarios:

- The results related to the alarm list indicate that:
 - Operators make a higher number of visual accesses to the alarm tag than to time and other parts of alarm list (scenarios 1 and 3), and the alarm tag than to the alarm value (scenario 3).
 - Operators make a higher number of visual accesses to the alarm text than to the alarm value, and to time and other parts of the alarm list (scenario 1); and the operators make a higher number of visual accesses to the alarm text than to the other three AOIs of alarm list (scenarios 2 and 3).
- In the alarm tile, the operators look at more frequently the alarm tile than alarm value, and time and other parts of alarm list (scenarios 1 and 2), and the alarm tile than time and other parts of alarm list (scenario 3).

Statistically significant effects of the operator position in the scenarios 2 and 3 indicate that the reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm AOIs than the turbine operators.

A summary of the statistically significant results of the number of visual accesses to five AOIs of the alarm system is included in Table 10-172.

Table 10-172. *Summary of ANOVA Analyses of 5 Alarm AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Frequency)*

Scenarios	Alarm Display (AOI) Effect	Operator Effect	Interaction Effect
Scenario 1	Tag > Others Text > Value, Others Tile > Value, Others ($p < .001$)		
Scenario 2	Text > Tag, Value, Others Tile > Value, Others ($p < .001$)	RO > TO ($p = .001$)	
Scenario 3	Tag > Value, Others Text > Tag, Value, Others Tile > Others ($p < .001$)	RO > TO ($p = .036$)	

10.12.2.4.2 ANOVA analyses of frequency data of five alarm areas of interest for scenario periods

The number of visual accesses to the four AOIs of the alarm list and the alarm tile was explored with the ANOVA technique, repeated measures, in all scenario periods (see 10.3.2.2 for a description of the scenario periods). The detailed ANOVA results are included in Appendix H.

10.12.2.4.2.1 ANOVA analyses of frequency data of 5 AOIs for 33 periods of scenario 1

A summary of the main results of ANOVA analysis of the number of visual accesses to five alarm AOIs in 33 periods of the scenario 1 is described in Table 10-173. In 31 of 33 periods exists, at least, an effect.

Statistically significant effects of the alarm AOIs are found in 27 periods of the scenario 1, and the paired comparisons were significant in 13 periods. The results indicate that the operators make a higher number of visual accesses to:

- alarm tag than to the alarm value in one period
- alarm tag than to time and other parts of the alarm list in one period
- alarm text than to the alarm tag and to alarm value in one period
- alarm text than to the alarm value in 2 periods
- alarm text than to the alarm value and to time and other parts of the alarm list in 4 periods
- alarm text than to time and other parts of the alarm list in 2 periods
- time and other parts of the alarm list than to the alarm tag and alarm value in one period
- alarm tile than to the alarm tag in 2 periods
- alarm tile than to time and other parts of the alarm list in 4 periods

A tendency to alarm system effects occurs in 4 periods, with a significant paired comparison between the AOIs of the alarm tile and time and other parts of alarm list.

A statistically significant effect of the operator position happens in one period of the scenario 1, indicating that the reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm system AOIs than the turbine operators.

A statistically significant interaction effect is found in the scenario 1, in the time and other parts of the alarm list and the reactor operators.

Table 10-173. *Main Results of Frequency Data for 33 Periods of Scenario 1 in Five AOIs*

Scen. 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
2	Paired comparison: <i>ns</i> ⁶⁹ (<i>p</i> = .035)	.728	.224						
3	Others > Tag, Value Tile > Tag (<i>p</i> = .001)	.976	.461				Others and RO (<i>p</i> = .023)	.730	.281
4	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .069)	.561	.217						
5	Text > Value, Others (<i>p</i> < .001)	.992	.424						
6	Tag > Value	.991	.500						

⁶⁹ The paired comparisons are not statistically significant when *p* < .05.

Scen. 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
	Text > Tag, Value ($p < .001$)								
7	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .009$)	.862	.280						
8	Text > Value ($p = .001$)	.969	.367						
9	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .093$)	.485	.205						
10	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .033$)	.648	.295						
11	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .006$)	.884	.335						
12	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .002$)	.944	.338						
13	Tile > Others ($p = .069$)	.517	.241						
14	Tile > Tag ($p = .002$)	.949	.391						
15	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .040$)	.682	.230						
16	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .022$)	.722	.301						
17	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .015$)	.787	.310						
18	Text > Value, Others Tile > Others ($p < .001$)	.990	.415						
19	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .023$)	.695	.341						
20	Text > Others ($p = .001$)	.967	.449						
21	Text > Value, Others ($p < .001$)	.998	.479						
22	Tile > Others ($p = .016$)	.770	.317						
23	Text > Others ($p < .001$)	.994	.436						
24	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .028$)	.726	.252						
25	Paired comparison: <i>ns</i> ($p < .001$)	.986	.403						
26	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .038$)	.659	.254						
28	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .044$)	.616	.260						
29	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .097$)	.544	.198						
30	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .020$)	.752	.289						
31	Text > Value Tile > Others ($p = .022$)	.699	.345	RO > TO ($p = .007$)	.860	.533			
32	Text > Value, Others Tile > Others ($p = .001$)	.952	.452						
33	Tag > Others ($p = .002$)	.940	.463						

10.12.2.4.2.2 ANOVA analyses of frequency data of 5 AOIs for 30 periods of scenario 2

A summary of the main results of the ANOVA analysis of the number of visual accesses to five alarm AOIs for 30 periods in the scenario 2 is presented in Table 10-174. In 27 of 30 periods of the scenario 2 some effects happened.

Statistically significant effects of the alarm AOIs occur in 23 periods of the scenario 2, and the paired comparisons were significant in 15 periods. The results indicate that the operators make a higher number of visual accesses to:

- alarm tag than to time and other parts of the alarm list in one period
- alarm text than to the alarm value, time and other parts of the alarm list, and the alarm tile in one period
- alarm text than to the alarm tag, the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in 3 periods
- alarm text than to the alarm value in 5 periods
- alarm text than to the alarm value, and time and other parts of the alarm list in 2 periods
- time and other parts of the alarm list than the alarm tag and the alarm value in one period
- alarm tile than to the alarm value in one period
- alarm tile than to the time and other parts of the alarm list in 4 periods.

A tendency to alarm system effects exist in 2 periods, with a significant paired comparison in carrying out a higher number of visual accesses to the alarm text than to the alarm tag and the alarm value.

Statistically significant effects of the operator position in the team occur in 10 periods and a tendency to an operator effect in 2 periods of the scenario 2. In all cases, the reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm system AOIs than the turbine operators.

There are statistically significant interaction effects in 2 periods of the scenario 2. The interaction effects are explained by time and other parts of alarm list and the reactor operators (period 8), and by the alarm tile and the reactor operators (period 9). A tendency to an interaction effect happens in 3 scenario periods, which is due to the alarm text and the reactor operators (period 16 and period 23), and the alarm tag and reactor operators (period 17).

Table 10-174. Main Results of Frequency Data for 30 Periods of Scenario 2 in Five AOIs

Scen. 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
2	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .014)	.826	.263						
3	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .046)	.691	.211						
4	Others > Tag, Value (<i>p</i> = .004)	.899	.405	RO > TO (<i>p</i> = .001)	.995	.717			
5				RO > TO (<i>p</i> = .027)	.644	.400			
8	Text > Tag, Value, Others (<i>p</i> < .001)	.991	.419				Others and RO (<i>p</i> = .004)	.911	.310
9	Text > Tag, Value, Others Tile > Others (<i>p</i> < .001)	.999	.595				Tile and RO (<i>p</i> = .021)	.914	.312

Scen. 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
10	Text > Value ($p = .007$)	.881	.291						
11	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .062$)	.646	.196	RO > TO ($p = .099$)	.377	.249			
12	Tile > Value ($p = .029$)	.695	.275						
13	Text > Value ($p = .009$)	.854	.293						
14	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .010$)	.827	.328						
15				RO > TO ($p = .006$)	.871	.541			
16	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .012$)	.840	.269	RO > TO ($p = .017$)	.727	.447	Text and RO ($p = .099$)	.570	.173
17	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .006$)	.890	.296	RO > TO ($p = .040$)	.570	.339	Tag and RO ($p = .069$)	.630	.191
18	Text > Value ($p = .019$)	.795	.249	RO > TO ($p = .029$)	.632	.393			
19	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .012$)	.804	.346						
20	Tile > Others ($p = .005$)	.900	.302						
21	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .046$)	.690	.211	RO > TO ($p = .022$)	.685	.423			
22	Text > Tag, Value ($p = .088$)	.485	.215						
23	Text > Value ($p = .016$)	.789	.292	RO > TO ($p = .001$)	.980	.667	Text and RO ($p = .080$)	.553	.200
24	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .022$)	.716	.321						
25	Tile > Others ($p = .001$)	.960	.355						
26	Text > Value ($p < .001$)	.991	.420	RO > TO ($p = .015$)	.753	.462			
27	Text > Value, Others ($p = .001$)	.958	.353						
28	Tag > Others Text > Tag, Value, Others ($p < .001$)	.999	.479	RO > TO ($p = .001$)	.980	.668			
29	Text > Value, Others ($p < .001$)	.981	.428	RO > TO ($p = .058$)	.491	.315			
30	Text > Value, Others, Tile Tile > Others ($p < .001$)	.999	.608						

10.12.2.4.2.3 ANOVA analyses of frequency data of 5 AOIs for 31 periods of scenario 3

A summary of the main results of the ANOVA analysis of the number of visual accesses to five alarm AOIs for 31 periods of the scenario 3 is described in Table 10-175. In 24 of 31 periods of the scenario 3 some effects happened.

Statistically significant effects of the alarm AOIs happen in 19 periods of the scenario 3, and the paired comparisons were significant in 13 periods. The results indicate that the operators make a higher number of visual accesses to:

- alarm text than to the alarm tag, the alarm value, the time and other parts of the alarm list, and the alarm tile in one period
- alarm text than to the alarm value in one period
- alarm text than to the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in 3 periods
- alarm text than to the alarm value, the time and other parts of the alarm list, and the alarm tile in one period
- alarm text than to the time and other parts of the alarm list in 4 periods
- alarm tile than to the alarm tag, and the time and other parts of the alarm list in one period
- alarm tile than to the alarm value in one period
- alarm tile than to the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in one period
- alarm tile than to the time and other parts of the alarm list in 4 periods.

A tendency to alarm system effects occur in 2 periods, without a significant paired comparison.

The statistically significant effects of the operator role are found in 5 periods of the scenario 3, and also a tendency to an operator effect occurs in 4 periods. The reactor operators make a higher number of visual accesses to the alarm system AOIs than the turbine operators.

Statistically significant interaction effects in 3 periods of the scenario 3 exist. The direction of the interaction effects are on the alarm text and the turbine operators (period 2), the alarm tile and the reactor operators (period 23), and the alarm text and the reactor operators (period 26). There are 2 periods with a tendency to an interaction effect in scenario 3, due to the alarm tile and the reactor operators (periods 6 and 18).

Table 10-175. *Main results of frequency data for 31 periods of scenario 3 in five AOIs*

Scen. 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
1	Tile > Tag, Others ($p = .001$)	.965	.405						
2	Text > Tag, Value, Others, Tile Tile > Value ($p < .001$)	.999	.631				Text and TO ($p = .019$)	.794	.249
3	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .023$)	.777	.242						
4	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .002$)	.945	.402						
5	Text > Value, Others, Tile ($p < .001$)	.997	.454						
6	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .005$)	.887	.376				Tile and RO ($p = .076$)	.536	.213
7	Text > Value Tile > Others ($p = .002$)	.954	.348						
8	Tile > Others ($p = .008$)	.855	.310	RO > TO ($p = .044$)	.546	.345			
10	Text > Others ($p = .002$)	.941	.335						
11	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .046$)	.626	.245						
12				RO > TO ($p = .055$)	.502	.321			

Scen. 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
13				RO > TO ($p = .071$)	.446	.289			
14	Text, Tile > Others ($p < .001$)	.991	.418						
15	Text > Others ($p = .001$)	.971	.372						
17	Tile > Value, Others ($p < .001$)	.998	.470						
18	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .086$)	.509	.207	RO > TO ($p = .024$)	.672	.416	Tile and RO ($p = .086$)	.509	.207
23	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .001$)	.967	.364	RO > TO ($p = .070$)	.451	.292	Tile and RO ($p = .012$)	.838	.268
25	Text > Value, Others ($p = .001$)	.964	.409	RO > TO ($p = .072$)	.443	.288			
26	Text, Tile > Others ($p < .001$)	.989	.411	RO > TO ($p = .011$)	.795	.489	Text and RO ($p = .025$)	.765	.238
27	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .008$)	.850	.324						
28	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .068$)	.596	.204						
29				RO > TO ($p = .021$)	.693	.427			
30	Text > Value, Others ($p = .006$)	.880	.335	RO > TO ($p = .003$)	.929	.593			
31	Text > Value, Others ($p < .001$)	.983	.395						

10.12.2.4.3 Summary of results of frequency data of five AOIs during scenario periods

In the scenarios 1, 2 and 3, there is some effect (five alarm AOIs, operator position or interaction) of the number of visual accesses in 31, 27 and 24 scenario periods, respectively.

The alarm system effects show variability in the alarm AOI. To point out some results, in the paired comparisons the operators not access more times to the alarm tag than to the alarm text or the alarm tile; however, opposite outcomes are achieved. The AOIs of the time and other parts of the list and the alarm value present the lowest frequency data.

A higher number of visual accesses to the alarm system by the reactor operators than by the turbine operators took place. Finally, not all the interaction effects point in the same direction, in most of them, the effects because of the reactor operators and one of the alarm AOIs.

10.12.2.4.4 ANOVA analyses of percentage of time gazing at five alarm areas of interest for total scenario time

The results of the ANOVA technique, repeated measures, on the proportion of time spent in five alarm AOIs, the effects of operator role, and their interactions are described separately for every scenario.

10.12.2.4.4.1 Percentage of time gazing at 5 alarm AOIs in scenario 1

The results of ANOVA on the effects of five alarm AOIs, the operator role, and the interaction effects in the scenario 1, for the duration data, are presented in Tables 10-176, 10-177 and 10-178.

Table 10-176. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 1*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.32	0.25
Turbine Operator	1.57	0.25

Table 10-177. *AOI (Duration): Marginal Means and SD of 5 Alarm AOIs in Scenario 1*

Alarm AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.49	0.24
Alarm Text	4.34	0.80
Alarm Value	0.83	0.20
Other parts of List	0.45	0.08
Alarm Tile	2.59	0.21

Table 10-178. *Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 1*

Alarm AOI	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	RO	1.55	0.90	AOI: 15.281 (1.722,17.218)	.000 ^(***)	Tag > Others
	TO	1.43	0.73			Text > Value, Others
	Total	1.49	0.78			
Alarm Text	RO	4.98	3.77	Operator: 4.679 (1,10)	.056 ⁽⁺⁾	Tile > Value, Others
	TO	3.70	1.13			
	Total	4.34	2.74			
Alarm Value	RO	0.88	0.86	AOI by Operator: 0.813 (1.722,17.218)	.443	RO > TO
	TO	0.78	0.48			
	Total	0.83	0.67			
Other Parts of Alarm List	RO	0.71	0.34			
	TO	0.19	0.19			
	Total	0.45	0.37			
Alarm Tile	RO	3.46	0.87			
	TO	1.73	0.54			
	Total	2.59	1.14			

(*) $p < .05$.(**) $p < .01$.(***) $p < .001$.(+) $p < .10$.

The highly statistically significant effects between some of the five alarm AOIs were in a longer use of the alarm tag than of the time and other parts of alarm list. The operators use both the alarm text and the alarm tile during a larger time than the alarm value and the time and other parts of alarm list.

A tendency to an operator effect indicates that the reactor operators spent more time viewing the alarm AOIs than the turbine operators.

Figure 10-71 shows the means of the percentage of time gazing at five AOIs of the alarm system in the scenario 1, by taking into account the operator role.

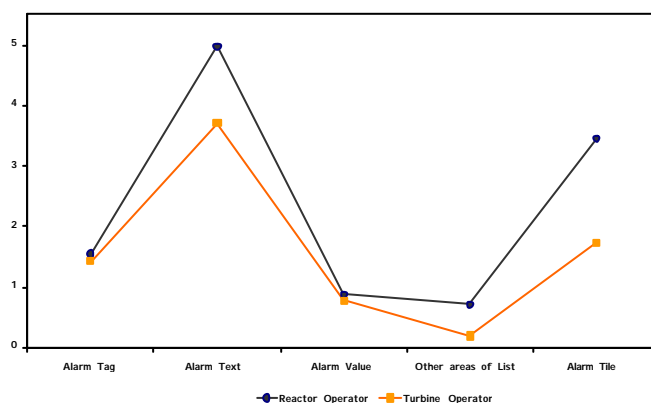


Figure 10-71. Means of duration of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 1.

10.12.2.4.4.2 Percentage of time gazing at 5 alarm AOIs in scenario 2

The results of the ANOVA for exploring the effects of five alarm AOIs, the operator role, and the interaction effects in the scenario 2, for the duration data, are in Tables 10-179, 10-180 and 10-181.

Table 10-179. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 2*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.91	0.20
Turbine Operator	1.53	0.20

Table 10-180. *AOI (Duration): Marginal Means and SD of 5 Alarm AOIs in Scenario 2*

Alarm AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.67	0.37
Alarm Text	4.40	0.53
Alarm Value	0.93	0.15
Other parts of List	1.36	0.24
Alarm Tile	2.71	0.27

Table 10-181. *Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario 2*

Alarm AOI	Operator	Mean	Standard deviation	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	RO	1.92	1.39	AOI: 16.467 (3.007,30.069)	.000 ^(***)	Text > Tag, Value, Others Tile > Value, Others
	TO	1.43	1.15			
	Total	1.67	1.24			
Alarm Text	RO	5.62	2.29	Operator: 23.355 (1,10)	.001 ^(***)	RO > TO
	TO	3.18	1.26			
	Total	4.40	2.17			
Alarm Value	RO	1.16	0.62	AOI by Operator: 1.666 (3.007,30.069)	.195	
	TO	0.70	0.39			
	Total	0.93	0.55			
Other Parts of Alarm List	RO	2.18	1.03			
	TO	0.55	0.52			
	Total	1.36	1.15			
Alarm Tile	RO	3.67	1.06			
	TO	1.76	0.81			
	Total	2.71	1.34			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

The highly statistically significant effects of alarm system are because of the operators make a longer use of the alarm text than of the rest of the alarm list AOIs (alarm tag, alarm value, and time and other parts of the alarm list). Also, the operators use longer time the alarm tile than the alarm value and time and other parts of the alarm list.

It is statistically significant that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm AOIs than the turbine operators.

Figure 10-72 shows the means of the percentage of time gazing at the five AOIs of the alarm system, by the operator role, in the scenario 2.

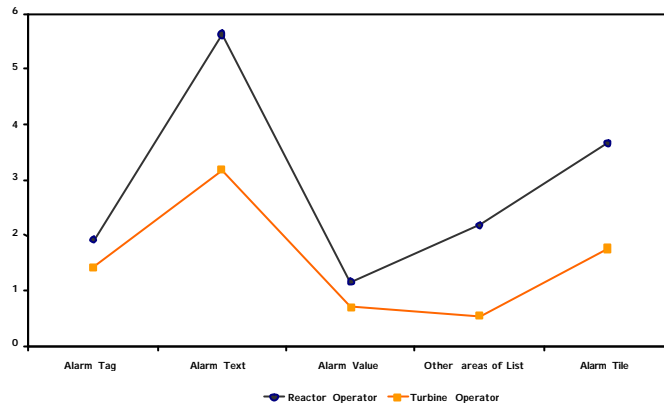


Figure 10-72. Means of duration of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 2.

10.12.2.4.4.3 Percentage of time gazing at 5 alarm AOIs in scenario 3

The results of the ANOVA analysis of the effects of five alarm AOIs, the operator role, and the interaction effects in the scenario 3, for the duration data, are in Tables 10-182, 10-183 and 10-184.

Table 10-182. *Operator: Marginal Means and SD in Scenario 3*

Operator Role	Mean	SD
Reactor Operator	2.47	0.28
Turbine Operator	1.23	0.28

Table 10-183. *AOI (Duration): Marginal Means and SD of 5 Alarm AOIs in Scenario 3*

Alarm AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.73	0.25
Alarm Text	3.49	0.46
Alarm Value	1.01	0.23
Other parts of List	0.69	0.15
Alarm Tile	2.34	0.29

Table 10-184. *Means and SD of 5 Alarm AOIs by Operator Role in Scenario*

Alarm AOI	Operator	Mean	SD	F (df). AOI, Operator and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	RO	2.17	0.94	21.494 (3,462,34,615)	.000 ^(***)	Text > Tag, Value, Others
	TO	1.30	0.81			
	Total	1.74	0.96			
Alarm Text	RO	4.53	1.95	9.684 (1,10)	.011 ^(**)	RO > TO
	TO	2.44	1.08			
	Total	3.49	1.86			
Alarm Value	RO	1.29	0.92	2.504 (3,462,34,615)	.068 ⁽⁺⁾	Tile and RO
	TO	0.72	0.67			
	Total	1.00	0.82			
Other Parts of Alarm List	RO	1.00	0.58			
	TO	0.38	0.45			
	Total	0.69	0.59			
Alarm Tile	RO	3.35	1.26			
	TO	1.32	0.61			
	Total	2.34	1.42			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

The highly statistically significant alarm system effects are because of a larger time spent in the alarm text than in the rest of the alarm list AOIs (alarm tag, alarm value, and time and other parts of the alarm list) by the operators; also, in the alarm tile than in the alarm value, and time and other parts of the alarm list.

It is statistically significant that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm AOIs than the turbine operators.

A tendency to an interaction effect is in the alarm tile and the reactor operators, according to the confidence intervals of Table 10-185 (i.e., there is not an overlapping of the confidence intervals of the operators with the alarm tile AOI). The reactor operators provide a higher score in the alarm tile than the turbine operators (see Figure 10-73).

Table 10-185. *Five Alarm AOIs by Operator (Interaction) Effect in Scenario 3*

Operator	Alarm AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
Reactor Operator	Alarm Tag	2.17	0.36	1.370	2.970
	Alarm Text	4.53	0.64	3.097	5.966
	Alarm Value	1.29	0.33	0.558	2.015
	Other parts of List	1.00	0.21	0.525	1.471
	Alarm Tile	3.35	0.40	2.453	4.250
Turbine Operator	Alarm Tag	1.30	0.36	0.498	2.098
	Alarm Text	2.44	0.64	1.004	3.873
	Alarm Value	0.72	0.33	-0.005	1.452
	Other parts of List	0.38	0.21	-0.095	0.851
	Alarm Tile	1.32	0.40	0.426	2.224

Figure 10-73 shows the means of the percentage of time gazing at five AOIs of the alarm system in the scenario 3, by the operator position in the team.

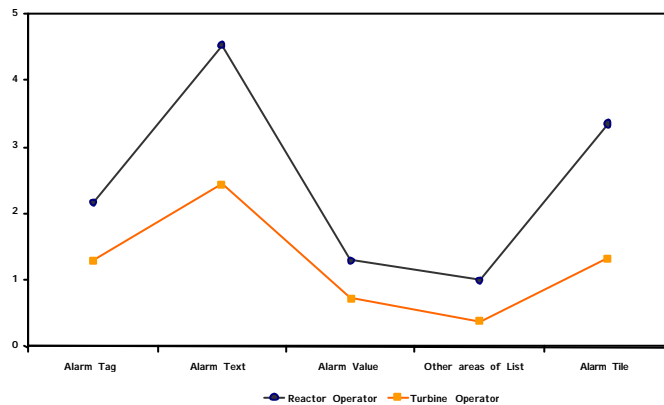


Figure 10-73. Means of duration of five alarm system areas of interest by operator role in scenario 3.

10.12.2.4.4.4 Statistical power and effect size in the amount of time monitoring at five alarm system AOIs, operator role and their interactions

The statistical power and the effect size of five AOIs of the alarm system, the operator role and their interactions for three scenarios are presented in Table 10-186.

Table 10-186. *Power and Effect Size of 5 AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Duration)*

Area of Interest	AOI		Operator		AOI by Operator	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
AOIs in Scenario 1	.994	.604	.498	.319	.159	.075
AOIs in Scenario 2	.999	.622	.991	.700	.392	.143
AOIs in Scenario 3	.999	.682	.800	.492	.609	.200

10.12.2.4.4.5 Summary of main results of the percentage of time gazing at five alarm AOIs in three scenarios

A summary of the statistically significant results of the percentage of time gazing at five AOIs of the alarm system is included in Table 10-187.

Statistically significant effects between some of the five alarm AOIs appeared. The operators use a longer time the alarm tile than the alarm value, and time and other parts of alarm list in all scenarios. The result related to the alarm list shows that the operators use during a larger time:

- the alarm text than of the rest of the alarm list AOIs (alarm tag, alarm value, and time and other parts of the alarm list) in the scenarios 2 and 3; also, the alarm text is used for a longer time than the alarm value and time and other parts of the alarm list in the scenario 1.
- the alarm tag than of time and other parts of alarm list in the scenario 1.

A statistically significant operator effect happens in the scenarios 2 and 3, and there is a tendency to an operator effect in the scenario 1. The reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm AOIs than the turbine operators.

A tendency to an interaction effect in the scenario 3 took place in the alarm tile and the reactor operators, according to the confidence intervals reached with the Bonferroni corrected test.

Table 10-187. Summary of ANOVA Analyses of 5 Alarm AOIs in Scenarios 1, 2 and 3 (Duration)

Scenarios	Alarm Display (AOI) Effect	Operator Effect	Interaction Effect
Scenario 1	Tag > Others Text > Value, Others Tile > Value, Others ($p < .001$)	RO > TO ($p = .056$)	
Scenario 2	Text > Tag, Value, Others Tile > Value, Others ($p < .001$)	RO > TO ($p = .001$)	
Scenario 3	Text > Tag, Value, Others Tile > Value, Others ($p < .001$)	RO > TO ($p = .011$)	Alarm tile and RO ($p = .068$)

10.12.2.4.5 Summary of results of ANOVA of five AOIs for total scenario time

The results of the ANOVA analysis for five alarm AOIs, covering the alarm tile and the four alarm list AOIs gave rise to:

- Statistically significant effects between some of the alarm AOIs in the frequency data. The alarm tag, alarm text or alarm tile reach higher scores than, for example, the alarm value and time and other parts of the alarm list. Significant effects are also found in the operator role in the scenarios 2 and 3.
- Statistically significant effects between some of the alarm AOIs in the duration data. The alarm tag, alarm text or alarm tile reach higher scores than, for example, the alarm value and time and other parts of alarm list. Significant effects are also found in the operator role in the scenarios 2 and 3, and a tendency in the scenario 1.

10.12.2.4.6 ANOVA analyses of duration data of five alarm areas of interest for scenario periods

The percentage of time looking at the four AOIs of alarm list and the alarm tile was explored with ANOVA, repeated measures, in all scenario periods (see 10.3.2.2 for a description of the scenario periods). The detailed ANOVA results are included in Appendix H.

10.12.2.4.6.1 ANOVA analyses of duration data of 5 AOIs for 33 periods of scenario 1

A summary of the main ANOVA results of the percentages of time spent monitoring the five alarm AOIs during 33 periods of the scenario 1 is described in Table 10-188. In 30 of 33 periods exists, at least, an effect.

Statistically significant effects of the alarm AOIs appeared in 24 periods of the scenario 1, and the paired comparisons were significant in 6 periods. The operators make a longer use of the:

- alarm tag than the time and other parts of the alarm list in one period
- alarm text than the alarm tag, the alarm value, the time and other parts of the alarm list, and the alarm tile in one period
- alarm text than the alarm value, and time and other parts of the alarm list in one period
- alarm text than the alarm value, and the alarm tile in one period
- alarm text than the time and other parts of the alarm list in 2 periods
- alarm tile than the time and other parts of the alarm list in 3 periods.

There is a tendency to alarm system effects in 6 periods, although the paired comparisons were non-significant.

Statistically significant operator effects occur in 2 periods of the scenario 1, and a tendency exists in 3 periods as well. All results indicate that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators.

There are 2 periods with a tendency to an interaction effect in the scenario 1, which are due to the alarm text and the reactor operators (period 6), and the alarm tile and the reactor operators (period 14).

Table 10-188. *Main Results of Duration Data in Five AOIs for 33 Periods of Scenario 1*

Scen. 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
2	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .042)	.703	.215						
5	Text > Value, Tile (<i>p</i> < .001)	.991	.419						
6	Text > Tag, Value, Others, Tile (<i>p</i> < .001)	.999	.699	RO > TO (<i>p</i> = .027)	.645	.400	Text and RO (<i>p</i> = .051)	.676	.206
7	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .017)	.806	.254						
8	Text, Tile > Others (<i>p</i> = .001)	.964	.450						
9	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .077)	.476	.244						
10	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .011)	.826	.301	RO > TO (<i>p</i> = .086)	.407	.267			
11	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .016)	.773	.315						
12	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .019)	.797	.250						
13	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .037)	.634	.286	RO > TO (<i>p</i> = .063)	.472	.304			
14	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .026)	.715	.277				Tile and RO (<i>p</i> = .087)	.520	.201
15	Paired comparison: <i>ns</i>	.824	.316						

Scen. 1 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
	($p = .011$)								
16	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .074$)	.513	.229						
17	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .011$)	.825	.318						
18	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .005$)	.884	.342						
19	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .030$)	.642	.350						
20	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .007$)	.852	.376						
21	Text > Value, Others Tile > Others ($p < .001$)	.988	.461						
22	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .008$)	.872	.286						
23	Text > Others ($p = .001$)	.966	.469						
24	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .044$)	.602	.274						
25	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .005$)	.902	.304						
26	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .081$)	.533	.206						
27	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .039$)	.599	.315						
28	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .068$)	.551	.225						
29	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .051$)	.621	.232						
30	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .079$)	.514	.218						
31	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .026$)	.720	.275	RO > TO ($p = .040$)	.567	.357			
32	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .044$)	.590	.283						
33	Tag, Text, Tile > Others ($p = .005$)	.879	.416	RO > TO ($p = .053$)	.507	.324			

10.12.2.4.6.2 ANOVA analyses of duration data of 5 AOIs for 30 periods of scenario 2

A summary of the main results of ANOVA analysis of the percentages of time spent monitoring the five alarm AOIs during 30 periods of the scenario 2 is in Table 10-189. In 25 of 30 periods of the scenario 2 some effects happened.

Statistically significant effects of the alarm AOIs were in 18 periods of the scenario 2, and the paired comparisons were significant in 12 periods. The operators make a longer use of the:

- alarm text than the alarm tag, the alarm value, the time and other parts of the alarm list, and the alarm tile in one period
- alarm text than the alarm tag in one period
- alarm text than the alarm tag, the alarm value, the time and other parts of the alarm list in one period
- alarm text than the alarm value in 4 periods
- alarm text than the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in 2 periods

- time and other parts of the alarm list than the alarm value in one period
- alarm tile than the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in 2 periods
- alarm tile than the alarm value in one period.

A tendency to alarm system effects appeared in 3 periods, with a significant paired comparison in that the operators make a longer use of the alarm tile than the alarm value AOI.

Statistically significant operator effects are in 6 periods of the scenario 2 and there is a tendency in 4 periods. The reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators.

There are statistically significant interaction effects in 2 periods, because of the time and other parts of alarm list and the reactor operators (periods 4 and 8). There is a tendency to an interaction effect in one period of the scenario 2, because of the alarm tile and the reactor operators (period 26).

Table 10-189. *Main Results of Duration Data in Five AOIs for 30 Periods of Scenario 2*

Scen. 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
3	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .053)	.670	.204						
4	Others > Value (<i>p</i> = .009)	.837	.360	RO > TO (<i>p</i> < .001)	.999	.829	Others and RO (<i>p</i> = .046)	.610	.254
5				RO > TO (<i>p</i> = .075)	.434	.283			
7				RO > TO (<i>p</i> = .067)	.458	.296			
8	Text > Tag, Value, Others, Tile (<i>p</i> < .001)	.999	.587				Others and RO (<i>p</i> = .004)	.918	.315
9	Text > Value, Others (<i>p</i> < .001)	.996	.539						
10	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .056)	.655	.204						
11				RO > TO (<i>p</i> = .097)	.381	.251			
12	Tile > Value (<i>p</i> = .077)	.554	.209						
13	Text > Value (<i>p</i> = .026)	.695	.302						
14	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .007)	.867	.337						
17	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .038)	.676	.240	RO > TO (<i>p</i> = .051)	.517	.329			
18	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .019)	.766	.286	RO > TO (<i>p</i> = .020)	.706	.435			
19	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .005)	.898	.301						
20	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .048)	.641	.231						
21				RO > TO (<i>p</i> = .043)	.555	.351			
22	Text > Tag (<i>p</i> = .022)	.768	.252						
23	Text > Value (<i>p</i> = .036)	.669	.257	RO > TO (<i>p</i> = .019)	.711	.438			
24	Paired comparison: <i>ns</i> (<i>p</i> = .035)	.650	.280						

Scen. 2 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
25	Tile > Value, Others ($p = .002$)	.940	.333						
26	Tile > Value, Others ($p = .018$)	.769	.285	RO > TO ($p = .039$)	.575	.362	Tile and RO ($p = .056$)	.612	.223
27	Text > Value ($p = .002$)	.952	.384						
28	Text > Value ($p < .001$)	.983	.408	RO > TO ($p = .008$)	.840	.518			
29	Text > Value, Others ($p < .001$)	.985	.399						
30	Text > Tag, Value, Others ($p < .001$)	.999	.485						

10.12.2.4.6.3 ANOVA analyses of duration data of 5 AOIs for 31 periods of scenario 3

A summary of the main results of the ANOVA analysis of the time spent monitoring the five AOIs of alarm system during 31 periods of the scenario 3 is presented in Table 10-190. In 22 of 31 periods of the scenario 3 some effects happened.

The statistically significant effects of the alarm AOIs appear in 16 periods of the scenario 3, and the paired comparisons were significant in 7 periods. The operators make a longer use of the:

- alarm text than the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in 3 periods
- alarm text than the alarm value, and the alarm tile in one period
- alarm text than the time and other parts of the alarm list in 2 periods
- alarm tile than the alarm text, the alarm value, and the time and other parts of the alarm list in one period
- alarm tile than the alarm value in one period.

A tendency to an alarm system effect in one period was with no-significant paired comparisons.

Statistically significant operator effects were in 5 periods and a tendency in 5 periods of the scenario 3. All results indicate that the reactor operators spent a larger percentage of time monitoring the alarm system AOIs than the turbine operators.

A statistically significant interaction effect happens on the alarm tile and the turbine operators (period 17), and tendencies to an interaction effect in 2 periods of the scenario 3. The direction of the interaction effects are on the alarm text and the turbine operators (period 2), and the alarm tile and the reactor operators (period 6).

Table 10-190. Main Results of Duration Data in Five AOIs for 31 Periods of Scenario 3

Scen. 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
1	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .071$)	.554	.217						
2	Text > Value, Others Tile > Value ($p < .001$)	.986	.533				Text and TO ($p = .095$)	.470	.207
4	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .037$)	.626	.288						
5	Text > Value, Tile	.997	.455						

Scen. 3 Period	Alarm display (AOIs) Effect	Power	Effect size	Operator Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
6	($p < .001$) Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .005$)	.882	.351	RO > TO ($p = .095$)	.385	.254	Tile and RO ($p = .077$)	.552	.205
7	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .005$)	.902	.304						
8	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .017$)	.710	.299	RO > TO ($p = .083$)	.414	.271			
11	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .024$)	.697	.329						
12				RO > TO ($p = .079$)	.425	.277			
13				RO > TO ($p = .033$)	.609	.381			
14	Text > Others ($p = .001$)	.967	.364						
15	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .009$)	.864	.281						
17	Tile > Text, Value, Others ($p < .001$)	.999	.523				Tile and TO ($p = .037$)	.695	.234
18				RO > TO ($p = .054$)	.503	.322			
22				RO > TO ($p = .085$)	.409	.268			
23	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .003$)	.921	.396						
25	Text > Value, Others ($p < .001$)	.986	.402						
26	Text > Others ($p = .009$)	.827	.358	RO > TO ($p = .004$)	.926	.590			
27	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .011$)	.811	.329						
29				RO > TO ($p = .034$)	.602	.377			
30	Paired comparison: <i>ns</i> ($p = .029$)	.676	.297	RO > TO ($p = .004$)	.922	.585			
31	Text > Value, Others ($p = .005$)	.903	.304	RO > TO ($p = .044$)	.547	.346			

10.12.2.4.7 Summary of results of duration data of five AOIs during scenario periods

In the scenarios 1, 2 and 3, there is some effect (five alarm AOIs, operator position or interaction) of the duration of the visual accesses in 30, 25 and 22 scenario periods, respectively.

The alarm system effects show variability in the alarm AOI. To point out some results, in the paired comparisons the alarm tag is not used more than the alarm text or the alarm tile; however, the opposite does happen. The AOIs of the time and other parts of the list, and the alarm value present the lowest duration data.

The reactor operators spent a longer time in the AOIs of the alarm system than the turbine operators. The interaction effects were not in the same direction, but most of them are explained by the reactor operators and one of the alarm AOIs.

10.12.3 Summary of results of hypotheses on alarm list versus alarm tile

The descriptive statistics and the ANOVA tests resulted in that the number of visual accesses and the time of operators gazing at the alarm list reach higher scores than the alarm tile in every scenario and for both operators type. The results of the frequency and duration data were statistically significant in all three scenarios.

By the scenario periods, apparently more amount of significant effects in the ANOVA analyses occur with five alarm AOIs than with two alarm AOIs. Some interaction effects exist, again more effects in five AOIs; however, not all results follow the same pattern.

The hypotheses are corroborated. First, the operators did a higher number of visual accesses to the alarm list than to the alarm tile. Second, the operators use for a larger time the alarm list than alarm tile. However, statistically significant effects of the operator position in the team took place in the scenarios 2 and 3, in the alarm frequency and alarm duration data.

10.13 HYPOTHESIS 11 ON THE USE OF ALARM TEXT VERSUS ALARM TAG

A detailed description of the alarm list is provided in 9.5.2.3.2. The alarm list display consists of four alarm AOIs: the alarm tag, the alarm text, the alarm value, and the time and other parts of the alarm list (see Table 94 and Figure 92). In fact, the alarm list display provides an alarm textual description (TEXT) and an alarm identification code (TAG) for each alarm (see Tables 9-11 and 9-12), which give equivalent information for identifying the alarm.

An example of an alarm tag is included in the column three of Table 9-11 (see 9.5.2.3.2). In the alarm system, the TAG is composed of letters and numbers, in where components and analog signals use an eight character code, and the binary signals are presented with an eleven character code.

An example of the alarm text is included in the column four of Table 9-11 and several examples of alarm texts are provided in Table 9-12.

10.13.1 Hypothesis on alarm text versus alarm tag

The hypothesis is that “highly experienced” operators will primarily read the alarm tag while “less experienced” operators will mainly use the alarm text for identifying the alarm.

10.13.2 Data analyses of alarm text versus alarm tag

The data analysis for the hypothesis on use of the alarm text versus the alarm tag consists on descriptive statistics, and ANOVA repeated measures during the total scenario time. Both the frequency and duration scores are investigated. Also, from the ANOVA results of five alarm AOIs, those related to the alarm tag versus the alarm text are summarized.

The operator role has not been considered, instead, the degree of operators’ operation experience is taken as dependent variable for this hypothesis.

10.13.2.1 Descriptive statistics

10.13.2.1.1 Descriptive statistics of operator experience and age

The same amount of reactor and turbine operators is grouped in two levels of operation experience. The classification is based on operators with 17 or less years of experience (in fact, the group is composed of operators with 12 or less year of experience) versus operators with 18 or more years of experience. The average of experience is 6.67 years for the first group, and 21 years of operation experience for the second group.

The descriptive statistics of operator experience and age are presented in Table 10-191.

Table 10-191. *Descriptive Statistics of Operator Experience*

Experience and age	Action	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Experience	Crew	4.00	24.00	13.83	7.87	-0.05
	RO	4.00	24.00	13.08	8.60	0.14
	TO	5.50	23.00	14.58	7.80	-0.24
Age	Crew	31.00	52.00	42.17	8.26	-0.10
	RO	31.00	52.00	41.83	8.89	-0.09
	TO	33.00	51.00	42.50	8.41	-0.13

10.13.2.1.2 Descriptive statistics of alarm text versus alarm tag

The results are presented including all four AOIs of the alarm list with the intention of providing background information. In the following, the tables present the average data over all operators. The detailed results of each operator in every scenario were previously presented (see Tables from 10-1 to 10-12).

10.13.2.1.2.1 Descriptive statistics for frequency data in alarm list areas of interest

The descriptive statistics of the frequency data of four AOIs of the alarm list (tag, text, value, and time and other parts of alarm list) are included in Table 10-192.

Table 10-192. *Descriptive Statistics for Frequency Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios*

Frequency data	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm tag	0.56	3.00	1.48	0.65	1.12
	Alarm text	1.15	8.30	3.25	2.04	1.48
	Alarm value	0.07	2.63	0.89	0.76	1.26
	Time and others	0.00	1.04	0.42	0.30	0.62
Scenario 2	Alarm tag	0.47	4.74	1.73	1.19	1.50
	Alarm text	1.19	7.56	3.61	1.79	1.00
	Alarm value	0.07	2.36	1.08	0.64	0.45
	Time and others	0.07	2.52	1.19	0.87	0.33
Scenario 3	Alarm tag	0.56	4.44	1.83	1.18	1.13
	Alarm text	0.56	7.89	3.18	2.10	0.82
	Alarm value	0.26	3.19	1.11	0.92	1.30
	Time and others	0.07	1.85	0.72	0.52	0.67

The mean number of visual accesses to the four AOIs of the alarm list in three scenarios was: alarm text 3.35%, alarm tag 1.68%, alarm value 1.03%, and time and other parts of the alarm list 0.78%. This is the alarm text AOI reaches a higher mean than the other three AOIs of the alarm list in all scenarios.

Tables 10-193 and 10-194 present descriptive data of the six reactor operators and the six turbine operators, respectively.

Table 10-193. *Descriptive Statistics of the Reactor Operators for Frequency Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios*

Frequency data	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm tag	0.89	3.00	1.57	0.73	1.95
	Alarm text	1.15	8.30	3.31	2.61	1.81
	Alarm value	0.07	2.63	0.90	0.93	1.68
	Time and others	0.41	1.04	0.60	0.26	1.20
Scenario 2	Alarm tag	0.47	4.74	2.23	1.47	0.88
	Alarm text	1.81	7.56	4.51	2.07	0.26
	Alarm value	0.30	2.36	1.28	0.76	0.22
	Time and others	1.24	2.52	1.94	0.50	0.06
Scenario 3	Alarm tag	1.04	4.44	2.50	1.25	0.70
	Alarm text	0.56	7.89	4.14	2.36	0.14
	Alarm value	0.26	3.19	1.43	1.11	0.87
	Time and others	0.67	1.85	1.06	0.43	1.53

The mean number of visual accesses of the reactor operators in three scenarios was: alarm text 3.99%, alarm tag 2.10%, alarm value 1.20%, and time and other parts of the alarm list 1.20%.

Table 10-194. *Descriptive Statistics of the Turbine Operators for Frequency Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios*

Frequency data	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm tag	0.56	2.19	1.38	0.61	0.06
	Alarm text	1.59	5.26	3.19	1.52	0.28
	Alarm value	0.33	1.78	0.88	0.63	0.59
	Time and others	0.00	0.56	0.24	0.21	0.35
Scenario 2	Alarm tag	0.52	1.89	1.22	0.57	-0.30
	Alarm text	1.19	3.44	2.70	0.88	-1.23
	Alarm value	0.07	1.33	0.87	0.47	-0.90
	Time and others	0.07	0.81	0.44	0.27	-0.19
Scenario 3	Alarm tag	0.56	2.37	1.16	0.67	1.35
	Alarm text	1.11	4.59	2.22	1.38	1.19
	Alarm value	0.30	2.00	0.80	0.64	1.73
	Time and others	0.07	1.00	0.38	0.36	1.24

The mean number of visual accesses of the turbine operators in three scenarios was: alarm text 2.71%, alarm tag 1.25%, alarm value 0.85%, and time and other parts of the alarm list 0.36%.

10.13.2.1.2.2 Descriptive statistics for duration data in alarm list areas of interest

The descriptive statistics of the duration data of the four AOIs of the alarm list are presented in Table 10-195.

Table 10-195. *Descriptive Statistics for Duration Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios*

Duration data	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm tag	0.49	3.34	1.49	0.78	1.24
	Alarm text	1.85	11.89	4.34	2.74	2.14
	Alarm value	0.15	2.37	0.83	0.67	1.25
	Time and others	0.00	1.15	0.45	0.37	0.82
Scenario 2	Alarm tag	0.34	4.39	1.67	1.24	0.92
	Alarm text	1.09	8.78	4.40	2.17	0.90
	Alarm value	0.11	2.16	0.93	0.55	0.85
	Time and others	0.06	3.80	1.36	1.15	0.88
Scenario 3	Alarm tag	0.44	3.51	1.74	0.96	0.49
	Alarm text	0.91	6.49	3.49	1.86	0.09
	Alarm value	0.24	2.51	1.00	0.82	0.92
	Time and others	0.06	2.05	0.69	0.59	1.09

The mean amount of time looking at the four AOIs of the alarm list in three scenarios was: alarm text 4.08%, alarm tag 1.63%, alarm value 0.92%, and time and other parts of the alarm list 0.83%. The alarm text AOI reaches a higher mean than the other three AOIs of the alarm list in all scenarios.

Tables 10-196 and 10-197 present the descriptive data of the six reactor operators and the six turbine operators, respectively.

Table 10-196. *Descriptive Statistics of the Reactor Operators for Duration Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios*

Duration data	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm tag	0.81	3.34	1.55	0.90	2.17
	Alarm text	1.85	11.89	4.98	3.77	1.54
	Alarm value	0.15	2.37	0.88	0.86	1.33
	Time and others	0.39	1.15	0.71	0.34	0.63
Scenario 2	Alarm tag	0.34	4.39	1.92	1.39	1.17
	Alarm text	3.30	8.78	5.62	2.29	0.61
	Alarm value	0.37	2.16	1.16	0.62	0.64
	Time and others	1.10	3.80	2.18	1.03	0.61
Scenario 3	Alarm tag	1.13	3.51	2.17	0.94	0.63
	Alarm text	0.91	6.49	4.53	1.95	-1.56
	Alarm value	0.28	2.51	1.29	0.92	0.40
	Time and others	0.41	2.05	1.00	0.58	1.34

The mean amount of time of the reactor operators in three scenarios was: alarm text 5.04%, alarm tag 1.88%, alarm value 1.11%, and time and other parts of alarm list 1.29%.

Table 10-197. *Descriptive Statistics of the Turbine Operators for Duration Data of Alarm List AOIs in Three Scenarios*

Duration data	Area of interest	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	Alarm tag	0.49	2.46	1.43	0.73	-0.05
	Alarm text	2.66	5.11	3.70	1.13	0.66
	Alarm value	0.31	1.42	0.78	0.48	0.60
	Time and others	0.00	0.44	0.19	0.19	0.19
Scenario 2	Alarm tag	0.38	2.94	1.43	1.15	0.69
	Alarm text	1.09	4.42	3.18	1.26	-0.99
	Alarm value	0.11	1.29	0.70	0.39	0.02
	Time and others	0.06	1.33	0.55	0.52	0.79
Scenario 3	Alarm tag	0.44	2.44	1.30	0.81	0.34
	Alarm text	1.24	4.05	2.44	1.08	0.55
	Alarm value	0.24	2.02	0.72	0.67	1.95
	Time and others	0.06	1.23	0.38	0.45	1.80

The mean amount of time of the turbine operators in three scenarios was: alarm text 3.11%, alarm tag 1.38%, alarm value 0.74%, and time and other parts of the alarm list 0.37%.

10.13.2.1.3 Summary of results

The descriptive statistics indicate that the alarm text AOI reach higher scores than the alarm tag in the frequency and duration data, considering the crew and the operator position. However, in the individual raw data of some operator, the frequency and duration of the alarm tag AOI gives higher or similar score than those of the alarm text AOI.

10.13.2.2 ANOVA analyses of five alarm AOIs

Previously in the document, the results of the ANOVA test for five AOIs of the alarm system, during the total scenario time, lead to that, in the paired comparisons, the alarm text is used a larger time or is accessed more times than to the alarm tag in the scenarios 2 and 3.

By the scenario periods, the operators used the alarm text a longer time than the alarm tag in one period of the scenarios 1 and 3, and in four periods of the scenario 2. The operators accessed to the alarm text more times than to the alarm tag in one period of the scenario 1, and in three periods of the scenario 2.

However, the operator experience was not considered as a variable in those ANOVA analyses.

10.13.2.3 ANOVAs analyses for alarm text and alarm tag areas of interest

The analysis was carried out with ANOVA repeated measures, between scenario designs and fixed factors model (2x2), in order to explore possible interaction effects between two AOIs of the alarm list (alarm tag and text), and the operator experience (17 years of experience or less versus over 17 years of experience). We present first the results related to the frequency data, and afterwards, the duration data.

10.13.2.3.1 ANOVA analyses of frequency data to test operators' experience and use of alarm text versus alarm tag

The hypothesis is that highly experienced operators will primarily read the alarm tag, while less experienced operators will mainly use the alarm text. The results of the analyses of the frequency and duration data on the alarm tag and alarm text in relation to operators' experience are presented, firstly, considering all three scenarios together (i.e., across scenarios), and secondly, for every scenario.

The number of visual accesses to the alarm tag and the alarm text, two of the alarm list AOIs, is analyzed for investigating possible interaction effects between the alarm AOIs and the operator experience.

10.13.2.3.1.1 Frequency data of alarm text versus alarm tag, and operator experience across three scenarios

The results of the ANOVA, repeated measure, on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interactions are shown for the frequency data across three scenarios (see Tables 10-198, 10-199 and 10-200).

Table 10-198. *Operator Experience: Marginal Means and SD across Three Scenarios*

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	8.53	1.44
Over 17 years	6.55	1.44

Table 10-199. *AOI (Frequency): Marginal Means and SD across Three Scenarios*

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	5.03	0.76
Alarm Text	10.04	1.43

Table 10-200. *Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience across Three Scenarios*

Alarm AOI (frequency)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	4.66	2.16	23.280 (1,10)	.001 ^(***)	Text > Tag
	Over 17	5.41	3.00			
	Total	5.03	2.52			
Alarm Text	17 or less	12.40	6.17	6.896 (1,10)	.025 ^(*)	Text and 17 or less
	Over 17	7.69	3.29			
	Total	10.04	5.32			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant alarm system effect shows that the operators carry out more amounts of visual accesses to the alarm text than to the alarm tag.

A statistically significant interaction effect appears in the alarm text and the less experienced operators. Overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the alarm list AOIs happens (see Table 10-201), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-74). In the post hoc tests, the results of the contrasts are non-significant ($t = 1.850$ of alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-201. *Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data across Three Scenarios*

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	4.66	1.07	2.28	7.04
	Alarm Text	12.40	2.02	7.90	16.90
Over 17 years	Alarm Tag	5.41	1.07	3.03	7.79
	Alarm Text	7.69	2.02	3.19	12.19

Figure 10-74 shows the means of the number of visual accesses to the alarm list AOIs, considering the operators' experience.

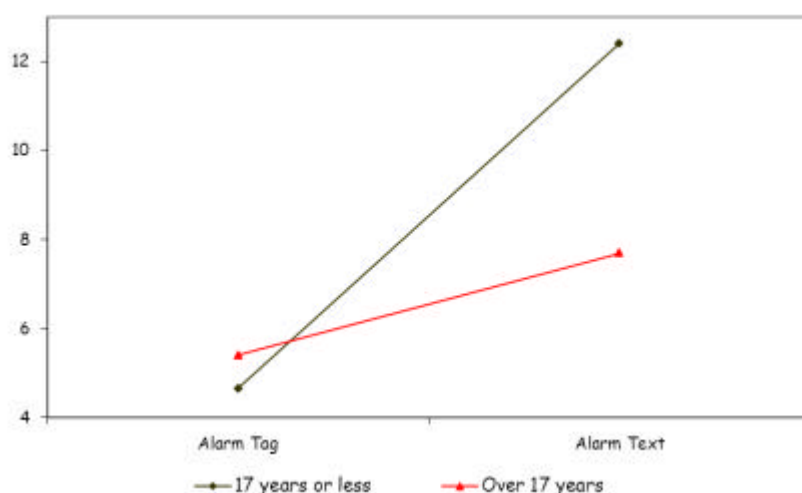


Figure 10-74. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience across three scenarios.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions across three scenarios are presented in Table 10-202.

Table 10-202. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs across Three Scenarios*

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.991	.700	.143	.086	.659	.408

10.13.2.3.1.2 Frequency data of alarm text versus alarm tag, and operator experience in scenario 1

The results of ANOVA, repeated measures, on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interactions are shown for the frequency data in the scenario 1 (see Tables 10-203, 10-204 and 10-205).

Table 10-203. *Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 1*

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	2.80	0.46
Over 17 years	1.93	0.46

Table 10-204. *AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 1*

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.48	0.20
Alarm Text	3.25	0.55

Table 10-205. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 1

Alarm AOI (frequency)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	1.43	0.42	AOI: 12.660 (1,10)	.005 ^(**)	Text > Tag
	Over 17	1.52	0.86			
	Total	1.48	0.65			
Alarm Text	17 or less	4.17	2.38	Operator experience: 1.799 (1,10)	.209	Text and 17 or less
	Over 17	2.34	1.21			
	Total	3.25	2.04			
AOI by Experience:				3.667 (1,10)	.085 ⁽⁺⁾	

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$. (***) $p < .001$. (+) $p < .10$.

A statistically significant alarm effect because the operators make more visual accesses to the alarm text than to the alarm tag.

A tendency to an interaction effect appears in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the alarm list AOIs happens (see Table 10-206), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-75). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.493$ of alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-206. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data in Scenario 1

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	1.43	0.28	0.81	2.05
	Alarm Text	4.17	0.77	2.45	5.88
Over 17 years	Alarm Tag	1.52	0.28	0.90	2.14
	Alarm Text	2.34	0.77	0.62	4.06

Figure 10-75 shows the mean of the visual accesses to the alarm list AOIs, taking into consideration the operators' experience.

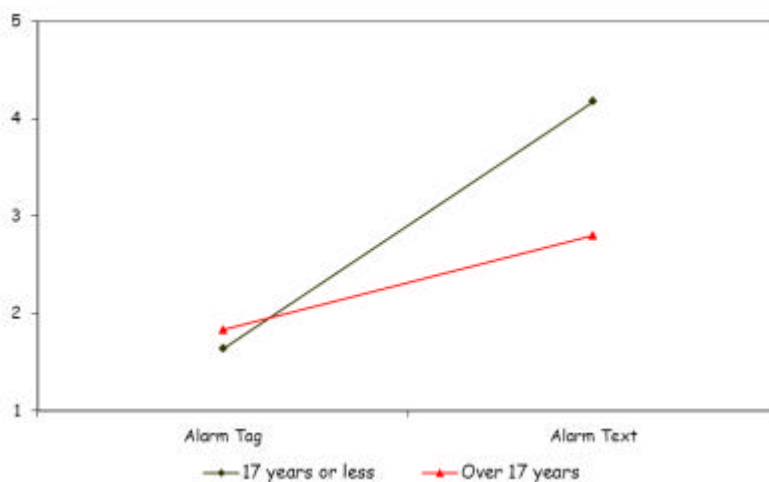


Figure 10-75. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience in scenario 1.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions in the scenario 1 are presented in Table 10-207.

Table 10-207. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs in Scenario 1*

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.893	.559	.229	.152	.410	.268

10.13.2.3.1.3 Frequency data of alarm text versus alarm tag, and operator experience in scenario 2

The results of the ANOVA repeated measure on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interactions are shown for the frequency data in the scenario 2 (see Tables 10-208, 10-209 and 10-210).

Table 10-208. *Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 2*

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	2.87	0.52
Over 17 years	2.46	0.52

Table 10-209. *AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 2*

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.73	0.34
Alarm Text	3.61	0.48

Table 10-210. *Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 2*

Alarm AOI (frequency)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	1.34	0.85	24.582 (1,10)	.001 ^(***)	Text > Tag
	Over 17	2.12	1.42			
	Total	1.73	1.19			
Alarm Text	17 or less	4.41	1.90	9.839 (1,10)	.011 ^(**)	Text and 17 or less
	Over 17	2.81	1.37			
	Total	3.61	1.79			

(*) $p < .05$.(**) $p < .01$.(***) $p < .001$.(+) $p < .10$.

A statistically significant alarm effect is due to a larger amount of visual accesses to the alarm text than to the alarm tag in the scenario 2.

A statistically significant interaction effect exists in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the alarm list AOIs happens (see Table 10-211), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-76). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.723$ of alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-211. *Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data in Scenario 2*

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	1.34	0.48	0.27	2.41
	Alarm Text	4.41	0.68	2.90	5.92
Over 17 years	Alarm Tag	2.12	0.48	1.05	3.18
	Alarm Text	2.81	0.68	1.30	4.31

Figure 10-76 shows the means of visual accesses to the alarm list AOIs by the operators' experience.

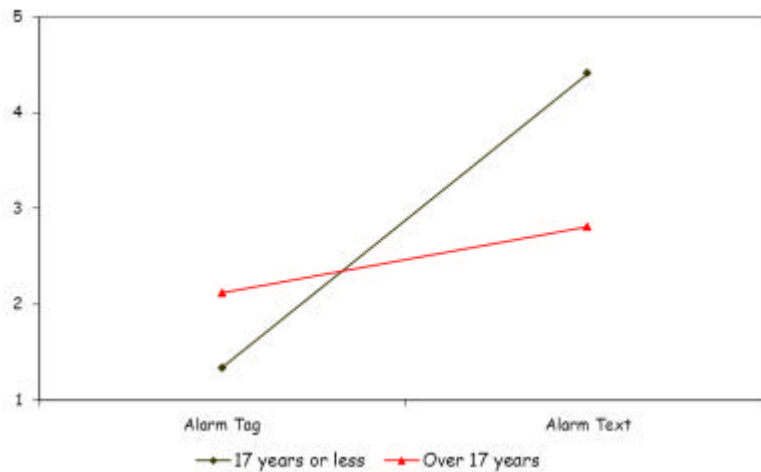


Figure 10-76. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience in scenario 2.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions in the scenario 2 are presented in Table 10-212.

Table 10-212. Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs in Scenario 2

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.993	.711	.080	.030	.807	.496

10.13.2.3.1.4 Frequency data of alarm text versus alarm tag, and operator experience in scenario 3

The results of the ANOVA repeated measure on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interaction are shown for the frequency data in the scenario 3 (see Tables 10-213, 10-214 and 10-215).

Table 10-213. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 3

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	2.86	0.66
Over 17 years	2.16	0.66

Table 10-214. AOI (Frequency): Marginal Means and SD in Scenario 3

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.83	0.36
Alarm Text	3.18	0.60

Table 10-215. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 3

Alarm AOI (frequency)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	1.89	1.40	18.871 (1,10)	.001 ^(***)	Text > Tag
	Over 17	1.77	1.05			
	Total	1.83	1.18			
Alarm Text	17 or less	3.82	2.37	0.551 (1,10)	.475	Text and 17 or less
	Over 17	2.54	1.76			
	Total	3.18	2.10			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant alarm effect because the operators carry out most amount of visual accesses to the alarm text than to the alarm tag.

A tendency to an interaction effect appears in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the

alarm list AOIs happens (see Table 10-216), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-77). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.677$ of alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-216. *Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Frequency Data in Scenario 3*

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	1.89	0.51	0.76	3.02
	Alarm Text	3.82	0.85	1.93	5.72
Over 17 years	Alarm Tag	1.77	0.51	0.64	2.90
	Alarm Text	2.54	0.85	0.65	4.44

Figure 10-77 shows the means of visual accesses to the alarm list AOIs, based on the operators' experience.

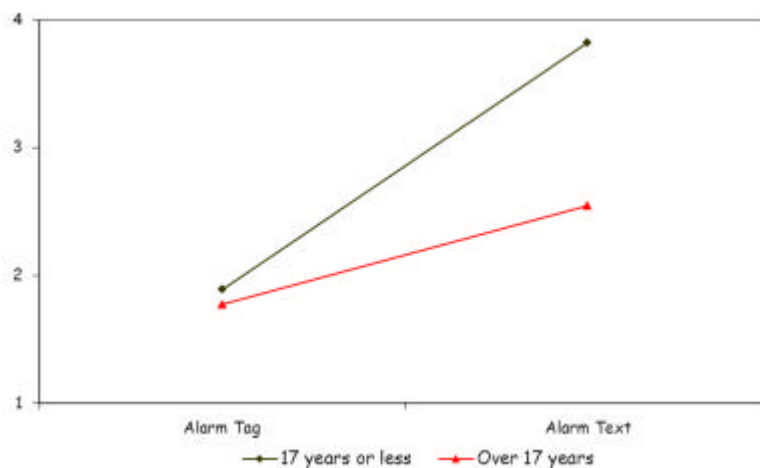


Figure 10-77. Means of frequency of alarm list AOIs by operator experience in scenario 3.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions in the scenario 3 are presented in Table 10-217.

Table 10-217. *Power and Effect Size of Number of Visual Accesses to 2 Alarm List AOIs in Scenario 3*

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.974	.654	.103	.052	.392	.258

10.13.2.3.2 ANOVA analyses of duration data to test operators' experience and use of alarm text versus alarm tag

The percentage of time that operators spent viewing the alarm tag and the alarm text of the alarm list is investigated in relation to possible interaction effects between the AOIs and the operator experience.

10.13.2.3.2.1 Duration data of alarm text versus alarm tag, and operator experience across three scenarios

The results of the ANOVA, repeated measures, duration data, on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interaction are shown, across three scenarios (see Tables 10-218, 10-219 and 10-220).

Table 10-218. *Operator Experience: Marginal Means and SD across Three Scenarios*

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	9.80	1.37
Over 17 years	7.33	1.37

Table 10-219. *AOI (Duration): Marginal Means and SD across Three Scenarios*

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	4.90	0.76
Alarm Text	12.23	1.49

Table 10-220. *Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience across Three Scenarios*

Alarm AOI (duration)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	4.14	1.99	28.289 (1,10)	.000 ^(***)	Text > Tag
	Over 17	5.65	3.16			
	Total	4.90	2.64			
Alarm Text	17 or less	15.45	6.66	1.634 (1,10)	.230	Text and 17 or less
	Over 17	9.00	3.04			
	Total	12.23	5.97			
				8.347 (1,10)	.016 ^(*)	

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A highly statistically significant alarm effect shows that the operators make a larger use of the alarm text than of the alarm tag.

A statistically significant interaction effect is in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the alarm list AOIs happens (see Table 10-221), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-78). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.911$ of alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-221. *Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data across Three Scenarios*

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	4.14	1.08	1.74	6.54
	Alarm Text	15.45	2.11	10.74	20.16
Over 17 years	Alarm Tag	5.65	1.08	3.25	8.06
	Alarm Text	9.00	2.11	4.29	13.71

Figure 10-78 shows the percentage of time gazing at the alarm list AOIs, based on the operators' experience.

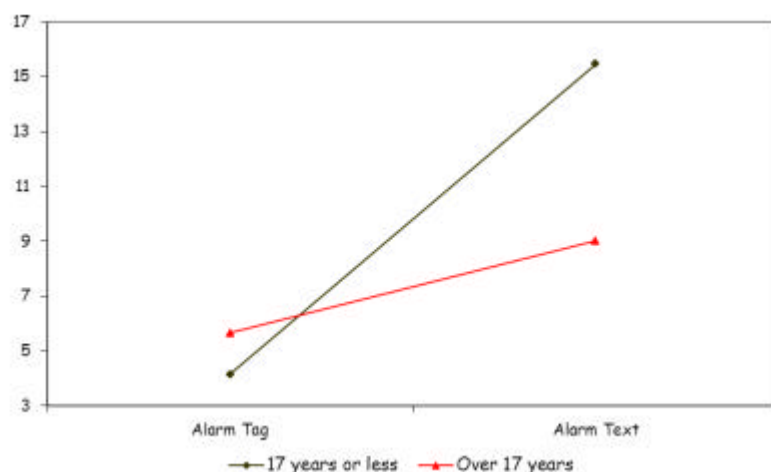


Figure 10-78. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience across three scenarios.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions across three scenarios are presented in Table 10-222.

Table 10-222. Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs across Three Scenarios

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.997	.739	.212	.140	.740	.455

10.13.2.3.2.2 Duration data of alarm text versus alarm tag, and operator experience in scenario 1

The results of the ANOVA, repeated measure, for analyzing the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interaction are shown in the duration data of the scenario 1 (see Tables 10-223, 10-224 and 10-225).

Table 10-223. Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 1

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	3.54	0.53
Over 17 years	2.29	0.53

Table 10-224. AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 1

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.49	0.23
Alarm Text	4.34	0.69

Table 10-225. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 1

Alarm AOI (duration)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	1.29	0.35	16.206 (1,10)	.002 ^(**)	Text > Tag
	Over 17	1.69	1.06			
	Total	1.49	0.78			
Alarm Text	17 or less	5.80	3.28	2.857 (1,10)	.122	Text and 17 or less
	Over 17	2.89	0.83			
	Total	4.34	2.74			

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

A statistically significant alarm system effect because the operators make a larger use of the alarm text than of the alarm tag.

A statistically significant interaction effect is in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the

alarm list AOIs occurs (see Table 10-226), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-79). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.677$ of the alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-226. *Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data in Scenario 1*

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	1.29	0.32	0.57	2.01
	Alarm Text	5.80	0.98	3.62	7.97
Over 17 years	Alarm Tag	1.69	0.32	0.97	2.41
	Alarm Text	2.89	0.98	0.71	5.06

Figure 10-79 shows the percentage of time gazing at the alarm list AOIs in the scenario 1, based on the operators' experience.

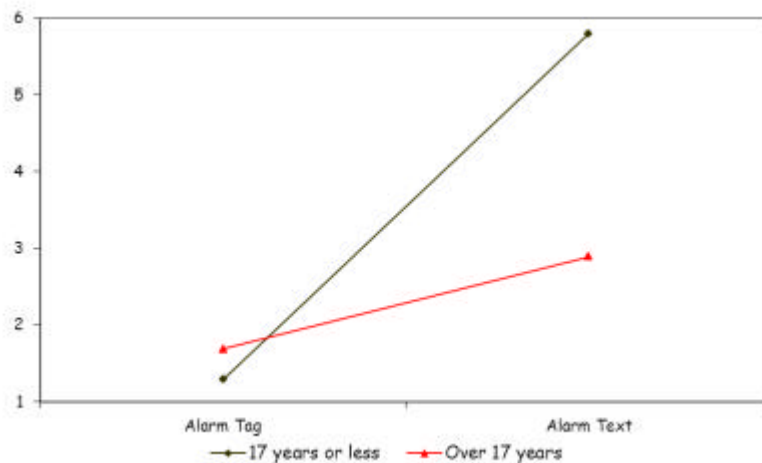


Figure 10-79. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience in scenario 1.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions in the scenario 1 are included in Table 10-227.

Table 10-227. *Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs in Scenario 1*

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.951	.618	.334	.222	.558	.352

10.13.2.3.2.3 Duration data of alarm text versus alarm tag, and operator experience in scenario 2

The results of the ANOVA, repeated measure, on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interactions are shown in the duration data of the scenario 2 (see Tables 10-228, 10-229 and 10-230).

Table 10-228. *Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 2*

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	3.35	0.53
Over 17 years	2.73	0.53

Table 10-229. *AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 2*

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.67	0.35
Alarm Text	4.40	0.56

Table 10-230. Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 2

Alarm AOI (duration)	Operator Experience	Mean	SD	F (df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	1.21	0.95	AOI: 24.016 (1,10)	.001 ^(***)	Text > Tag
	Over 17	2.14	1.40			
	Total	1.67	1.24			
Alarm Text	17 or less	5.48	2.29	Operator experience: 0.685 (1,10)	.427	Text and 17 or less
	Over 17	3.32	1.53			
	Total	4.40	2.17			
AOI by Experience:				7.697 (1,10)	.020 ^(*)	

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$. (***) $p < .001$. (+) $p < .10$.

A statistically significant alarm effect is due to a larger use of the alarm text than of the alarm tag in the scenario 2.

A statistically significant interaction effect is in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the alarm list AOIs occurs (see Table 10-231), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-80). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.587$ of the alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-231. Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data in Scenario 2

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	1.21	0.49	0.12	2.30
	Alarm Text	5.48	0.79	3.72	7.25
Over 17 years	Alarm Tag	2.14	0.49	1.05	3.23
	Alarm Text	3.32	0.79	1.55	5.09

Figure 10-80 shows the percentage of time gazing at the alarm list AOIs in the scenario 2 considering the operators' experience.

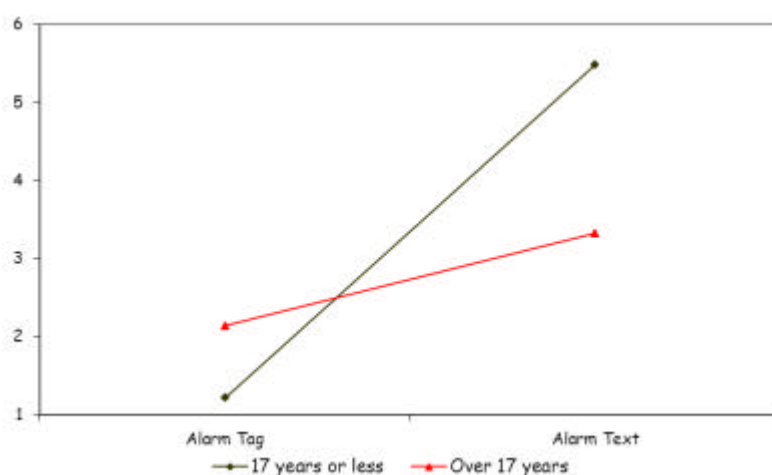


Figure 10-80. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience in scenario 2.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions in the scenario 2 are presented in Table 10-232.

Table 10-232. *Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs in Scenario 2*

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.992	.706	.117	.064	.706	.435

10.13.2.3.2.4 Duration data of alarm text versus alarm tag, and operator experience in scenario 3

The results of the ANOVA, repeated measure, on the effects of the alarm text and the alarm tag, the operator experience and their interactions are shown in the duration data of the scenario 3 (see Tables 10-233, 10-234 and 10-235).

Table 10-233. *Operator Experience: Marginal Means and SD in Scenario 3*

Operator Experience	Mean	SD
17 years or less	2.91	0.53
Over 17 years	2.31	0.53

Table 10-234. *AOI (Duration): Marginal Means and SD in Scenario 3*

AOI	Mean	SD
Alarm Tag	1.73	0.29
Alarm Text	3.49	0.52

Table 10-235. *Means and SD of Alarm Text and Alarm Tag by Operator Experience in Scenario 3*

Alarm AOI (duration)	Operator Experience	Mean	SD	F(df). AOI, Experience and Interaction	p-value	Paired comparison
Alarm Tag	17 or less	1.64	1.09	20.733 (1,10)	.001 ^(***)	Text > Tag
	Over 17	1.83	0.89			
	Total	1.73	0.95			
Alarm Text	17 or less	4.17	1.85	0.628 (1,10)	.446	Text and 17 or less
	Over 17	2.80	1.75			
	Total	3.49	1.86			

(*) $p < .05$. (**) $p < .01$. (***) $p < .001$. (+) $p < .10$.

A statistically significant alarm effect shows that the operators use the alarm text during a larger time than the alarm tag.

A tendency to an interaction effect is in the alarm text and the less experienced operators. The overlapping of the confidence intervals of the operators' experience level with the alarm list AOIs occurs (see Table 10-236), but there is a wider distance in the alarm text; the less experienced operators provide the highest score in the alarm text (see Figure 10-81). In the post hoc tests, the results of contrasts are non-significant ($t = 1.461$ of the alarm text, with a required value for the Student's t distribution of $t_{(0.025,10)} = 2.22814$).

Table 10-236. *Interaction Effect of Alarm List AOIs by Operator Experience in Duration Data in Scenario 3*

Operator Experience	Alarm List AOI	Mean	Standard error	95% Confidence Interval (Bonferroni Corrected)	
				Lower Bound	Upper Bound
17 years or less	Alarm Tag	1.64	0.41	0.73	2.54
	Alarm Text	4.17	0.73	2.54	5.81
Over 17 years	Alarm Tag	1.83	0.41	0.93	2.74
	Alarm Text	2.80	0.73	1.16	4.43

Figure 10-81 shows the percentage of time gazing at the alarm list AOIs in the scenario 3 based on the operators' experience.

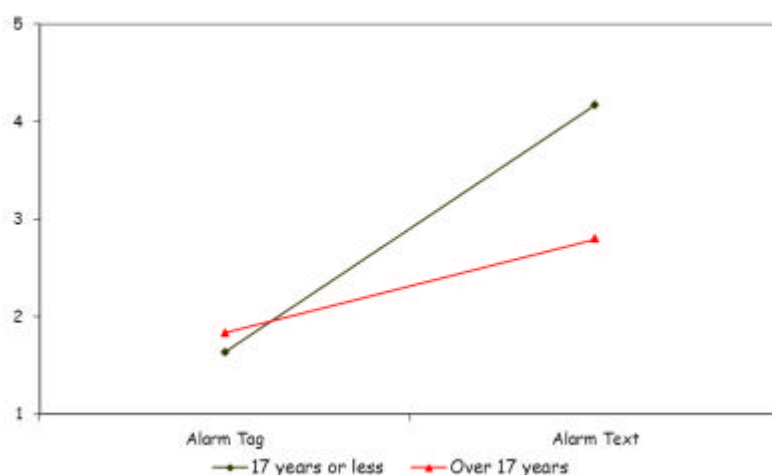


Figure 10-81. Means of duration of alarm list AOIs by operator experience in scenario 3.

The statistical power and the effect size of the alarm list AOIs, the operator experience and their interactions in the scenario 3 are presented in Table 10-237.

Table 10-237. *Power and Effect Size of Percentage of Time Gazing at 2 Alarm List AOIs in Scenario 3*

Area of Interest	Alarm System (AOI)		Operator Experience		AOI by Experience	
	Power	Effect size	Power	Effect size	Power	Effect size
Alarm list AOIs	.983	.675	.111	.059	.455	.295

10.13.2.4 Summary of results of alarm AOI (alarm tag and text) and operator experience

A summary of the main statistically significant results of the ANOVA analysis of the percentage of time gazing at and the number of visual accesses to the alarm list AOIs and the operators' experience is presented in Table 10-238. All results are systematically oriented towards the same direction.

Table 10-238. *Main Results of Frequency and Duration Data of Alarm Text versus Alarm Tag, and Operator Experience*

Scenario	Frequency Duration	Alarm list AOIs Effect	Power	Effect size	Interaction Effect	Power	Effect size
All scenarios	Frequency	Text > Tag ($p = .001$)	.991	.700	Text and = 17 years ($p = .025$)	.659	.408
	Duration	Text > Tag ($p < .001$)	.997	.739	Text and = 17 years ($p = .016$)	.740	.455
Scenario 1	Frequency	Text > Tag ($p = .005$)	.893	.559	Text and = 17 years ($p = .085$)	.410	.268
	Duration	Text > Tag ($p = .002$)	.951	.618	Text and = 17 years ($p = .042$)	.558	.352
Scenario 2	Frequency	Text > Tag ($p = .001$)	.993	.711	Text and = 17 years ($p = .011$)	.807	.496
	Duration	Text > Tag ($p = .001$)	.992	.706	Text and = 17 years ($p = .020$)	.706	.435
Scenario 3	Frequency	Text > Tag ($p = .001$)	.974	.654	Text and = 17 years ($p = .092$)	.392	.258
	Duration	Text > Tag ($p = .001$)	.983	.675	Text and = 17 years ($p = .068$)	.455	.295

The main statistically significant effects of the alarm text versus the alarm tag and the operators' experience are as follows:

- Statistically significant effects of the alarm list AOIs are observed in all the ANOVA analyses in the frequency and duration data. The operators make a larger use and a higher number of visual accesses to the alarm text AOI than to the alarm tag AOI.
- There are no statistically significant effects in the level of experience of the sample of operators.

- Significant interaction effects (or a tendency to an interaction effect) are detected in all the ANOVA analyses of the frequency and duration data, which in all cases are explained by the alarm text AOI and the less experienced operators. The results of the contrasts in the post hoc tests are non-significant in any case.

However, individual differences are observed in the raw data. Two reactor operators and two turbine operators did a similar number of accesses to the alarm text and the alarm tag in some scenarios, even with a higher score in the alarm tag in a few cases.

10.13.3 Summary of results of alarm text versus alarm tag

Summarizing the descriptive statistics and ANOVA results, in all cases, the alarm text data reach higher values than the alarm tag data, both in frequency and in duration, with statistical significance.

In spite of this, statistically significant effect because of the operator experience level not exists, across three scenarios or within each scenario. It can be observed in Figures from 10-74 to 10-81, the curves from the frequency and duration of two alarm list areas, that the operators with more experience tend to score higher in the alarm text than in the alarm tag. It can also be seen that the data of duration and frequency in the alarm text have a wider distance than in the alarm tag because of the less experienced operators. This explains the interaction effects.

Further, the main difference in the alarm tag scores because of the experience level is found in the scenario 2.

In addition, overall, it appears that the more experienced operators scored higher than the less experienced operators in the alarm tag. Also, the more experienced operators tend to use the two sources of information more evenly than the less experienced operators.

10.14 HYPOTHESES 12 AND 13 ON ALARM HANDLING ACTIONS

Alarm handling action of the operators is explored in this section. The operator's actions on CASH alarm system (interaction with the system) include acknowledgement (ACK), compress (COM) and silence (SIL). The alarm management actions, or alarm handling, are explained before formulating the hypotheses. The operators' action of compressing, silence and acknowledgement in CASH system are described in 9.5.2.3.3 and in 10.1.4.2.

10.14.1 Description of alarm handling actions

The possible operator's actions to perform in CASH alarm system are as follows:

- Global acknowledgment. Operator acknowledges all alarms (primary side and secondary side).
- Primary side acknowledgment. Reactor operator acknowledges alarms of the primary side.
- Secondary side acknowledgment. Turbine operator acknowledges alarms of the secondary side.
- Primary side compress. Reactor operator compresses alarms of primary.
- Secondary side compress. Turbine operator compresses alarms of the secondary side.
- Global compress. Operator compresses all alarms (primary side and secondary side).
- Silence action. Operator silences the alarm sound (audible alarm annunciation).

10.14.2 Hypotheses and predictions on alarm handling actions

Two hypotheses related to the operator's actions on the handling of alarm information are defined:

- The operators will take a higher number of alarm silence actions than of alarm acknowledge or alarm compress. A prediction is that the amount of actions will be, in decreasing order: silence, acknowledge and compress.
- For acknowledging and compressing alarms, the operators will mainly do use of individual options, i.e., primary for the reactor operators or secondary for the turbine operators, instead of global options (which in fact act simultaneously on the alarm displays of both operators).

Not statistically significant differences because of the operator role are expected in the outcomes.

10.14.3 Data analyses of alarm handling actions

10.14.3.1 Data analyses of alarm handling related to amount of operators' actions

The data analyses for the hypotheses present the descriptive statistics, Pearson correlations and ANOVA repeated measures for the total scenario time.

10.14.3.1.1 Descriptive statistics

The descriptive statistics of the alarm treatment actions (acknowledge, compress and silence) were presented earlier in the descriptive statistics section of results (see Table 10-16). The mean scores are 37.14 (acknowledge), 54.58 (silence), and 55.58 (compress). In all scenarios, less amount of acknowledgment actions are done. In the scenarios 1 and 2, the silence actions reach the highest values.

A summary of the mean scores of the alarm treatment actions is presented, for every scenario, in Figure 10-82; the data are for each individual operator and also averaged over all operators at the crew level. It can be observed that the scenario 1 presents a lower amount of actions than the other scenarios. Many compress actions are done in the scenario 3.

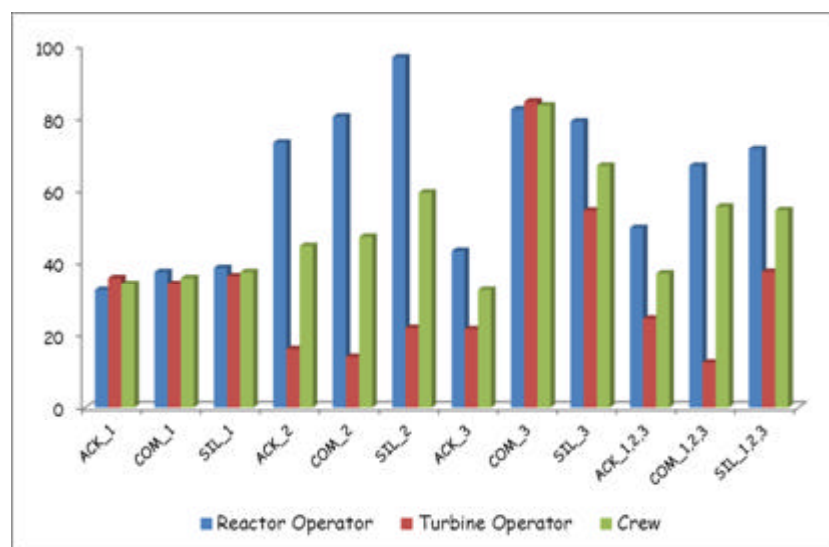


Figure 10-82. Alarm handling actions in scenarios.

Individual differences on the alarm handling actions were observed between teams. Therefore, a qualitative summary description has been obtained for the crews in every scenario, which is included in Appendix I.

Table 10-239 presents the main results of the alarm handling actions of the crew 1 along three scenarios. When comparing the results of the alarm handling actions carried by the operators:

- The turbine operator did the alarm handling actions in more amounts of periods of two of the scenarios than the reactor operator.
- The reactor operator hardly carried out global compress actions and acknowledgment actions. The turbine operator didn't use the global actions in two scenarios; however, he employed both secondary actions and global actions in one scenario.
- Both operators tended to do more actions of compress and silence than the acknowledgment actions.
- The alarm handling actions were mainly performed in one or two keyboards.

Table 10-239. *Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 1 in Three Scenarios*

Summary of actions of reactor operator	Summary of actions of turbine operator
<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 61.14% of periods (78.79%, 43.33%, 61.29%) – Only took 2 “Global ACK” actions (in scenario 2) – Only took 2 “Global COM” actions (in scenario 2) – Did more actions of compress and silence than acknowledgment actions – Very often when he silenced, also he compressed the alarms – The alarm handling actions were done in the screens 1 and 2 	<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 52.77% of periods (39.39%, 86.67%, 32.26%) – Mainly took “Secondary ACK” actions. The “Global ACK” actions were some few carried out in scenario 1, but did not any acknowledgment at all in scenario 2 – Mainly took “Secondary COM” actions”, as the “Global COM” actions were some few only in scenario 1 – Did more actions of compress and silence than acknowledgment actions in two scenarios – Very often when he silenced, he also compressed the alarms – The alarm handling actions were in the screens 1 and 2 in two scenarios, and only used the screen 2 in scenario 2

Table 10-240 presents the main results of the alarm handling action of crew 2 along three scenarios. When comparing the results of the alarm handling actions of both operators:

- The reactor operator did alarm handling actions in more scenario periods than the turbine operator.
- The reactor operator didn't take (or hardly) actions of global acknowledgment and of compress; on the other hand, the turbine operator only employed global actions.
- The reactor operator did more actions of compress and of acknowledgement than of silence actions in two of the three scenarios; however, the turbine operator took a similar amount of alarm handling actions.
- The alarm handling actions were taken in two or three keyboards.

Table 10-240. *Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 2 in Three Scenarios*

Summary of actions of reactor operator	Summary of actions of turbine operator
<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 47.74% of periods (48.48%, 36.67%, 58.06%) – Only took 2 “Global ACK” actions in scenario 3 – Only took 2 “Global COM” actions in scenario 3 – Did more actions of compress and acknowledgment than silence actions in two scenarios – Usually the actions of compress and acknowledgment were done close in time – The alarm handling actions were never taken in the screen 4 	<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 79.98% of periods (72.73%, 83.33%, 83.87%) – Didn’t take any “Secondary ACK” actions – Didn’t take any “Secondary COM” actions – Did a similar amount of actions of compress, silence and acknowledgment in each scenario, with a higher amount of actions in the scenario 3 – Very often when he compressed, he also silenced the alarms – The alarm handling actions were usually taken in the screens 1 and 2

Table 10-241 presents the main results of the alarm handling action of crew 3 along three scenarios. When comparing the results of the alarm handling actions of both operators:

- The reactor operator did alarm handling actions in more scenario periods than the turbine operator, mainly due to the scenario 2.
- The reactor operator only took global actions of acknowledgment and compress, while the turbine operator employed the secondary actions of acknowledgment and compress.
- While the reactor operator did more acknowledgement actions, the turbine operator exhibited more silence actions.
- The alarm handling actions were often done in three keyboards.

Table 10-241. *Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 3 in Three Scenarios*

Summary of actions of reactor operator	Summary of actions of turbine operator
<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 45.65% of periods (45.45%, 36.67%, 54.84%) – Didn’t take any “Primary ACK” action – Didn’t take any “Primary COM” action – Did more acknowledgment actions in the scenarios, being similar the number of actions of acknowledgement and silence in two scenarios. Also, he silenced a similar number of times across three scenarios – The actions of silence and acknowledgment were done close in time in two scenarios – The alarm handling actions were done in three screens 	<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 48.15% of periods (39.39%, 56.67%, 48.39%) – Did only one “Global ACK” action in one scenario – Did only one “Global COM” action in one scenario – Did more silence actions in all scenarios; also, he presented a similar number of actions of acknowledgment and compress – In the periods with alarm handling action, usually he did silence actions – The alarm handling actions were done in three screens

Table 10-242 presents the main results of the alarm handling actions of crew 4 along three scenarios. When comparing the results of the alarm handling actions of both operators:

- The reactor operator did alarm handling actions in more scenario periods than the turbine operator.
- Both operators didn’t take (or hardly) global actions of acknowledge and compress.
- The reactor operator carried out a lower number of silence actions than of acknowledgment and compress in two scenarios; the turbine operators acknowledged more than compressed or silenced.
- The alarm handling actions were taken in one or two keyboards.

Table 10-242. *Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 4 in Three Scenarios*

Summary of actions of reactor operator	Summary of actions of turbine operator
<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 23.38% of periods (21.21%, 16.67%, 32.26%) – Did only two “Global ACK” actions in scenario 2 – Did only two “Global COM” actions in scenario 2 – Did the same amount of actions of acknowledgment and compress in the scenarios 1 and 2, with a lower number of silence actions in both scenarios – Actions of acknowledgment and compress were done close in time in two scenarios – The alarm handling actions were mainly taken in the screen 3 in all scenarios 	<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 48.08% of periods (39.39%, 50.00%, 54.84%) – Didn’t take any “Global ACK” action – Didn’t take any “Global COM” action – Did more acknowledgment actions than compress or silence in all scenarios – He usually did actions of acknowledgment and silence – The alarm handling actions were done in the screens 1 and 2

Table 10-243 presents the main results of the alarm handling actions of crew 5 along three scenarios. The results of the alarm handling actions of the operators show that:

- The reactor operator did alarm handling actions in more scenario periods than the turbine operator.
- Both operators hardly carried out global actions of compress and acknowledge.
- The reactor operator did more compress actions than of acknowledgment and silence; however, the turbine operator took a similar amount of alarm handling actions.
- The alarm handling actions were mainly taken in two or three keyboards.

Table 10-243. *Summary of Acknowledgment, Compress, and Silence Actions of Crew 5 in Three Scenarios*

Summary of actions of reactor operator	Summary of actions of turbine operator
<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 37.96% of periods (51.52%, 33.33%, 29.03%) – Did “Global ACK” actions in one period – Did “Global COM” actions in one period – In all scenarios, he did more compress actions; and, in two scenarios he did lesser number of silence actions, and even less acknowledgment actions – When he compressed the alarms, he usually did silence and/or acknowledgment – The alarm handling actions were done in the screens 3 and 4 	<ul style="list-style-type: none"> – Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 77.55% of periods (78.79%, 70.00%, 83.87%) – Did one “Global ACK” action in two scenarios – Did one “Global COM” action in two scenarios – Did a similar number of actions of silence, acknowledgment and compress – He usually did actions of silence, acknowledgment and compress – The alarm handling actions were done in three screens

Table 10-244 presents the main results of the alarm handling actions of crew 6 along three scenarios. Summarizing, the results of the alarm handling actions of the operators show that:

- The reactor operator did alarm handling actions in more scenario periods than the turbine operator.
- Both operators didn’t (or hardly) take global actions of compress and acknowledgement.
- Both operators tended to do more silence actions than compress or acknowledgment.
- The alarm handling actions were mainly taken in two keyboards.

Table 10-244. *Summary of Acknowledgment, Compress and Silence Actions of Crew 6 in Three Scenarios*

Summary of actions of reactor operator	Summary of actions of turbine operator
– Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 43.44% of periods (48.48%, 36.67%, 45.16%)	– Did not make any alarm handling action in a mean percentage of 64.84% of periods (66.67%, 63.33%, 64.52%)
– Didn't take any "Global ACK" action	– Didn't take any "Global ACK" action
– In one scenario period, he did 6 "Global COM" actions	– Didn't take any "Global COM" action
– Did more actions of silence, then compress and less acknowledgment in all three scenarios	– Did more silence actions in two scenarios
– Always that he did acknowledgment and/or compress, he did silence	– In the periods with alarm handling action, usually when he did acknowledgment and/or compress, he silenced
– The alarm handling actions were done in the screens 1 and 2	– The alarm handling actions were done in the screens 1 and 2

10.14.3.1.2 Pearson correlations

The Pearson correlations, based on means, have been calculated for alarm handling actions in the total scenario time. The correlations are estimated with between and within designs for three scenarios. Bivariate correlations and partial correlations have been performed.

Table 10-245 presents the correlations between the operator's actions for alarm treatment across scenarios. Many correlations are highly significant, with the highest scores between acknowledgment and silence for the crews and the reactor operators, while for the turbine operators highlight silence and compress. Partial correlations across scenarios, which take into account the occurrence of new alarms, are exhibited in Table 10-246. Partial correlations are in all cases higher.

Table 10-245. *Pearson Correlations between Alarm Handling Actions Data across Scenarios*

Role	Operator action		
	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM
Crew	.613 ^(*)	.922 ^(**)	.792 ^(**)
RO	.865 ^(*)	.961 ^(**)	.953 ^(**)
TO	.464	.636	.914 ^(*)
No. of data	12/6	12/6	12/6

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

Table 10-246. *Partial Pearson Correlations between Alarm Handling Actions across Scenarios*

Role	Operator action		
	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM
Crew	.793 ^(**)	.935 ^(**)	.898 ^(**)
No. of data	12	12	12

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

Table 10-247 presents the correlations between the operator's actions for alarm handling in the three scenarios. The correlations are usually high and statistically significant. The compress action is related to acknowledge or silence in all scores, except in the scenario 2 of the turbine operators. Nevertheless, the scenario 3 exhibit less significant correlations than the other scenarios, with the highest correlation between silence and compress.

Table 10-247. *Pearson Correlations between Alarm Handling Actions' Data across Scenarios by Operator Role*

Role	Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3		
	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM
Crew	.963 ^(**)	.705 ^(*)	.799 ^(**)	.985 ^(**)	.969 ^(**)	.977 ^(**)	-.109	.383	.852 ^(**)
RO	.913 ^(*)	.849 ^(*)	.968 ^(**)	.995 ^(**)	.989 ^(**)	.996 ^(**)	.414	.819 ^(*)	.831 ^(*)
TO	.998 ^(**)	.712	.718	.401	.727	.172	-.577	-.524	.995 ^(**)
Data	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6	12/6

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

Partial correlations, considering the occurrence of new alarms, are higher (see Table 10-248).

Table 10-248. *Partial Pearson Correlations between Alarm Handling Actions' Data across Scenarios*

Role	Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3		
	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM	ACK-COM	SIL-ACK	SIL-COM
Crew	.967 ^(**)	.715 ^(*)	.801 ^(**)	.994 ^(**)	.974 ^(**)	.977 ^(**)	.253	.665 ^(*)	.855 ^(**)
Data	12	12	12	12	12	12	12	12	12

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

10.14.3.1.3 Analysis of operators' actions for alarm handling with ANOVA

The number of operator actions in the CASH alarm system during the total scenario time have been analyzed with the ANOVA test, repeated measures and one fixed factor (alarm handling), with three dependent variables: acknowledgment, compress and silence. The covariance was the number of new alarms in the scenario. Moreover, possible interaction effects between the alarm handling actions and the operator role are explored.

The ANOVA analysis was carried out across three scenarios and separately for each scenario. All the detailed ANOVA results are presented in Appendix J. The statistically significant results of the ANOVA tests on effects of the alarm handling, new alarms, the operator, and the alarm handling by new alarms are presented in Table 10-249.

Table 10-249. *Significant Results of ANOVA Analyses for Alarm Handling Actions*

Scenario type	Effect	<i>F</i>	<i>p</i> -value	power	effect size
Across scenarios	Alarm handling	3.479 _(2,20)	.051 ⁽⁺⁾	.582	.258
			<i>ns</i>		
	Alarm handling by new alarms (COV)	8.210 _(2,20)	.002 ^(**)	.929	.451
Across scenarios by operator role	Alarm handling	3.710 _(2,18)	.045 ^(*)	.604	.292
			<i>ns</i>		
	Alarm handling by new alarms (COV)	8.526 _(2,28)	.002 ^(**)	.934	.486
Scenario 3	New alarms	5.160 _(1,10)	.046 ^(*)	.537	.340
	Alarm handling by new alarms (COV)	13.421 _(1.381,13.805)	.001 ^(***)	.965	.573
Scenario 3 by role	Operator	3.413 _(1,9)	.098 ⁽⁺⁾	.379	.275
			RO > TO		
	Alarm handling by new alarms (COV)	15.807 _(1.607,14.459)	.000 ^(***)	.991	.637

^(*) $p < .05$.

^(**) $p < .01$.

^(***) $p < .001$.

⁽⁺⁾ $p < .10$.

The results indicate an interaction effect on the number of new alarms and alarm handling actions across scenarios. This means that the main effect of the alarm actions is mediated by the number of new alarms. Neither the scenario 1 nor 2 have statistically significant effects. Consequently, the principal effect is due to the significant interactions in the scenario 3. Statistically significant effects were not found between the alarm treatment actions.

However, it was observed that the reactor operator of crew 6 and the turbine operator of crew 1 are the main contributors to the effects, since many nuisance alarms were presented in the scenarios. When both operators were not considered in the ANOVA analyses, the statistically significant results were only in the scenario 2 by the operator role ($F(1,7) = 18,524$, $p = .004$, power = .96, and partial Eta-squared = .73), where the reactor operators carried a higher number of alarm handling actions than

the turbine operators. Also it was significant the interaction effect (alarm handling by operator role), with $F(2,14) = 3.694$, $p = .051$, power = .58, and partial Eta-squared = .35, where none of the alarm handling actions of the reactor operators overlapped to the turbine operator actions.

10.14.3.1.4 Summary of results of amount of alarm handling actions

A summary of the descriptive statistics, Pearson correlations and ANOVA analyses is included in this section.

Some differences happen between the scenarios. The scenario 1 presents some lower amount of actions, and evenly distributed between action handling types. The scenario 3 exhibits less significant correlations (with many compress actions).

Further, individual differences on alarm actions were observed between teams. Even, many (nuisance) alarms were announced to two operators.

The correlations of the reactor operators, across scenarios, were high statistically significant between the actions of silence and acknowledge ($r(4) = .961$, $p < .01$) and silence and compress ($r(4) = .953$, $p < .01$); silence and compress for the turbine operators ($r(4) = .914$, $p < .05$); at the crew level, silence and acknowledge ($r(10) = .922$, $p < .01$) and silence and compress ($r(10) = .792$, $p < .01$).

Partial correlations, which take into account the occurrence of new alarms, provide higher scores than the other correlations, both across all scenarios and for every scenario.

An interaction effect on the number of new alarms and the alarm handling actions across scenarios was found, with the principal effect because of the scenario 3. No statistically significant differences have been found with the ANOVA analysis between the alarm treatment actions.

10.14.3.2 Data analyses on alarm handling related to the use of controls for all alarms versus alarm based on operator position

The data analyses are based on the descriptive statistics and repeated measures ANOVA for the total scenario time.

10.14.3.2.1 Descriptive statistics of individual and global alarm handling actions

The descriptive statistic of the actions of alarm acknowledgement and compress is presented in Table 10-250.

Table 10-250. *Descriptive Statistics of Individual and Global Alarm Handling Actions*

Scenario	Action	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Skewness
Scenario 1	ACK primary	0.00	55.00	29.00	23.94	-0.22
	ACK secondary	0.00	91.00	31.83	35.84	1.13
	ACK global	0.00	20.00	3.75	6.81	1.76
	COM primary	0.00	74.00	34.83	27.47	0.16
	COM secondary	0.00	89.00	30.33	33.96	1.27
	COM global	0.00	15.00	3.25	5.58	1.44
Scenario 2	ACK primary	0.00	208.00	66.83	72.65	1.91
	ACK secondary	0.00	35.00	14.83	14.58	0.43
	ACK global	0.00	34.00	3.92	9.68	3.23
	COM primary	0.00	240.00	75.17	83.73	2.04
	COM secondary	0.00	21.00	12.50	7.29	-0.92
	COM global	0.00	26.00	3.42	7.46	2.98
Scenario 3	ACK primary	0.00	100.00	37.33	34.82	1.26
	ACK secondary	0.00	41.00	18.00	18.41	0.57
	ACK global	0.00	21.00	4.83	8.32	1.44
	COM primary	0.00	177.00	77.83	62.40	0.60
	COM secondary	0.00	425.00	81.17	169.00	2.41
	COM global	0.00	20.00	4.08	6.33	1.72

Figures 10-83 and 10-84 present the means of acknowledge and compress actions, by primary or secondary side options versus global, for the reactor operators, the turbine operators and the crews. The graphics show a higher amount of individual actions in relation to acknowledgment and compress. The turbine operators also take less acknowledgement actions than the reactor operators in the scenarios 2 and 3, and less compress actions in the scenario 2.

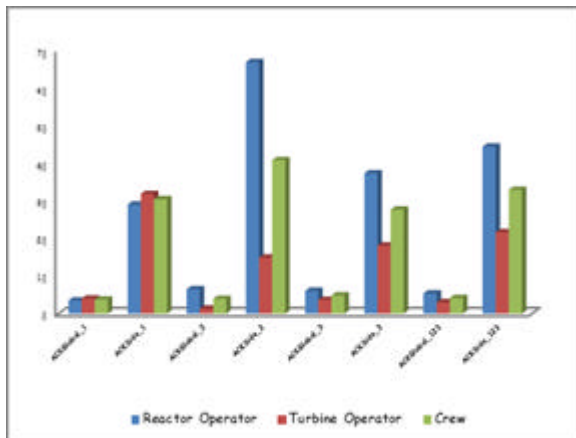


Figure 10-83. Acknowledgment actions: global versus primary or secondary.

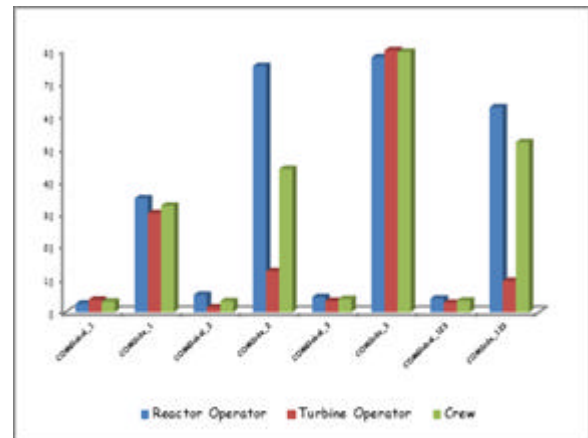


Figure 10-84 Compress actions: global versus primary or secondary.

10.14.3.2.2 Analysis of operators individual and global actions for alarm handling with ANOVA

This hypothesis of alarm handling actions was also investigated with the ANOVA technique.

For the acknowledgment actions, the ANOVA analyses compare the global acknowledgment with acknowledgment of primary or secondary side. All ANOVA tests conclude that the operators carried out a higher number of primary or secondary actions than of global actions. Statistically significant results are found in:

- Across three scenarios ($F(1,10) = 7.382$, $p = .022$, power = .69, and partial Eta-squared = .43)
- Scenario 1 ($F(1,10) = 8.590$, $p = .015$, power = .75, and partial Eta-squared = .46)
- Scenario 2 ($F(1,10) = 4.899$, $p = .051$, power = .52, and partial Eta-squared = .33)
- Scenario 3 ($F(1,10) = 5.714$, $p = .038$, power = .58, and partial Eta-squared = .36).

Analyzing the operator role, a tendency to an effect is detected in the scenario 2, in the direction that the reactor operators acknowledge more times than the turbine operators ($F(1,10) = 4.185$, $p = .068$, power = .46, and partial Eta-squared = .29) (see Figure 10-83).

For the compress actions, ANOVA analyses compare the global compress versus compress of primary or secondary side. The operators carried out a higher number of primary or secondary compress actions than of global compress actions. Statistically significant results are found in:

- Across three scenarios ($F(1,10) = 7.643$, $p = .020$, power = .70, and partial Eta-squared = .43).
- Scenario 1 ($F(1,10) = 9.982$, $p = .010$, power = .81, and partial Eta-squared = .50).
- Scenario 2 ($F(1,10) = 4.867$, $p = .052$, power = .51, and partial Eta-squared = .33)
- Scenario 3 ($F(1,10) = 4.127$, $p = .070$, power = .45 and partial Eta-squared = .29).

Analyzing the operator position, a tendency to an effect is detected in the scenario 2, in the direction that the reactor operators compressed more times than the turbine operators ($F(1,10) = 4.211$, $p = .067$, power = .46, and partial Eta-squared = .29) (see Figure 10-84).

10.14.3.2.3 Summary of results of alarm treatment actions: global versus individual

The findings with the ANOVA technique indicate statistically significant results in the alarm treatment actions across three scenarios and on a scenario basis. The actions of acknowledgment and compress using the options of primary or secondary side are statistically significant: the operators carried out a higher number of primary or secondary actions than of global actions.

Analyzing the operator role, a tendency to an effect is detected in the scenario 2. The reactor operators acknowledge and compress more times than the turbine operators.

10.14.3.3 Summary of results of hypotheses related to alarm handling actions

No statistically significant differences have been found with the ANOVA analyses between the alarm treatment actions. However, there are distinctions between the scenarios. For example, the scenario 1 presents some lower amount of actions, which are evenly distributed between the alarm action handling types. The presentation of new alarm influences in the alarm treatment actions. Further, individual differences on the alarm actions were observed between teams.

High correlations exist between the actions of acknowledgment and silence for the crews and reactor operators; and between silence and compress for the turbine operators.

In both actions type of acknowledgment and compress, the operators carried out a higher number of primary or secondary actions than of global actions, with statistically significant findings across three scenarios and on a scenario basis. A tendency to an effect of the operator role is detected in the scenario 2: the reactor operators acknowledge and compress more times than the turbine operators.

11 DISCUSSION OF RESULTS, LIMITATIONS, AND FUTURE WORK

The chapter presents the discussion of the results and the main achievements of the current research, the limitations of the study, and highlights the areas of potential research and the future work.

11.1 DISCUSSION OF RESULTS

The discussion of results will be exposed for each of the hypotheses and research questions raised in the study. Often in this section, the findings respond to more than a research question, therefore, those results are presented together.

Alarm system is a vital element in the process control, helping the operator to maintain variables within normal operating range and keeping safety of the plant. In the instructions of the study, it was not formulated a special request to the operators for employing the alarm system. According to Torralba, Martínez-Arias and Solá (2007, p. 94) ‘As the alarm system was not any independent variable to be manipulated in the human-centred automation experiment, it was expected operators employing the alarm system in their ‘common way’ during the scenarios, without feeling any pressure on using it more frequently.’ Moreover, the scenarios provided realistic operating situation and lasted around 45 minutes, in which several failures were presented to the operators at different times of the scenario (see in 9.4.2.2 the scenario description).

Furthermore, it should be noted, it is well known in the nuclear industry that in many scenarios, the task assigned to the operators can be performed in different ways, i.e., often exist multiple solution paths to arrive at the correct solution, all of which are acceptable. The operators may reach a goal using different combinations of actions. The implication is that may occur that different crews are not faced with identical states of their systems when the faults occur. This has been observed in the current experiment. Notwithstanding, the identification of an ‘ideal solution path’ for each scenario, pointing out the critical operator actions, is highly relevant for understanding the operator performance in the scenario analysis.

“The operator’s role in detecting early signs of a problem and taking appropriate actions to prevent further degradation is a key element in preventing abnormal situations from occurring” (Mumaw et al., 2000, p. 37). During the experimental runs, the control room operators were required to perform their tasks as in the real context. The research examines operator performance during fault management, by analyzing the visual activity of the operators. Moray and Rotenberg (1989, p. 1319) approached to the fault management in process control with behavioral data: “Eye movements give considerable additional insight into the nature of process control information processing compared with traditional measures of operator performance.” The eye movements reveal when something is not observed, and the information often provides clear clues on failure in diagnosing (Kirwan, Kaarstad, Hauland, & Follesø, 1995).

In the experiment, the total time of the eye movement data related to the alarm system is 1620 minutes (i.e., 27 hours), and the total time of the eye movement data in the interface of the control room (30 AOIs) is 990 minutes (i.e., 16.5 hours).

In simulator experiments usually the data are aggregated for exploring trends (patterns) across scenarios. However, the data analysis can also focus in outliers and deviations at the individual case level. We have covered both the general (crew) and the specific level (individual operators) in the data analysis, because of the average individual data may miss information related with performance variability (i.e., crew variability).

In this study, the primary focus is on the presentation of alarm information and how operators use the alarm system in the control room. A total of thirteen hypotheses, or research questions, are defined and analyzed in the project (see 8.12.2). The first hypothesis explores the percentage of time spent monitoring the alarm AOIs. The second hypothesis refers to the detection time of the crews. The third hypothesis considers the diagnosis of the disturbance. The fourth hypothesis deals with the information source of the interface which the operators use for detecting the disturbance. The fifth hypothesis explores the functions of the alarm system. The sixth hypothesis analyzes if there is a quadratic trend with the appearance of anomalies, during the detection phase. The seventh and eighth hypotheses investigate if there is a homogenous data distribution across the three scenarios by crews in all alarm AOIs (data of frequency and duration). The ninth and tenth hypotheses refer to the number of visual accesses and the dwell time of the operators in the two alarm screens: alarm list versus alarm tile. The eleventh hypothesis considers two AOIs of the alarm list: the alarm textual description and the alarm identification code tag, and how the experience of the operators modulates the use of those AOIs. The twelfth and thirteenth hypotheses deal with the alarm handling actions of the operators: the amount of alarm treatment actions (silence, acknowledgment and compress) as well as the individual and global options (act simultaneously on the alarm displays of both operators) to compress and acknowledge the alarms.

Regarding the first hypothesis, related to the proportion of time allocated to the alarm system, the results indicate that operators spent approximately 10% of available scenario time (i.e., approximately 45 minutes) monitoring the alarm system in an advanced control room simulator. This result conforms to the prediction of a panel of five experts in NPP operation that alarm system will be used less than 10% of the available scenario time in advanced control rooms (Skraaning & Andresen, 1999), around 10% was also estimated by Baber (1990, as cited in Stanton, 1994a), and Reinartz and Reinartz (1989, as cited in Stanton, 1992, 1994a, 1996a, and in Stanton & Baber, 1995).

The allocation of a 10% of the dwell time on the alarm system is measured as an averaged over all operators. There seems to be two factors that modulate the results: the operator position in the control room and the scenario characteristics or design (i.e., the scenarios varied with respect to the complexity⁷⁰ of the operators' tasks). These are, in fact, considered for further exploration, since more research may be needed for the generalizability of results across conditions. These factors constitute the so called interaction effects. In previous investigation of alarm system in simulators in the nuclear domain, Brown et al. (2000) and O'Hara, Brown, et al. (2000) detected interaction effects because of the scenario complexity as well.

In relation to the shift crew role, the reactor operators contribute with a longer time looking at the alarm system than the turbine operators (i.e., 12.82% versus 7.21%), and statistically significant in

⁷⁰ The level of complexity is determined by the state of a number of different characteristics in the scenario: root cause difficulties, spread of information, confusion, breadth of information gathering and co-ordination, obviousness, attention demand, severity and temporal demand (Hollnagel & Miberg, 1999).

the ANOVA analysis ($p = .001$); the lack of an interaction effect ($p > .05$) refers that the operator effect was similar across scenarios (see Table 10-98). The time range of reactor operators cover from 11.57% of the scenario 1 up to 14.54% of the scenario 2 (i.e., in all scenarios the time was above 11%) (Table 10-57). On the other hand, the turbine operators spent monitoring the alarm system between the 6.16% of the scenario 3 and 7.84% of the scenario 1 (see Table 10-57).

A plausible explanation for the variability on the usage of alarm system due to the operator role could be in the assigned responsibilities to the operators in the control room's shift. The reactor operator takes care of the primary circuit: the nuclear side of the plant. The turbine operator is responsible of the turbine operation and electricity generation.

In relation to the scenario characteristics, the scenario order was controlled. The order was balanced with Latin Square technique for avoiding the crews performing the scenarios in the same sequence. Not statistically significant order effects were found at the alarm system as a whole, with a variance component model.

The mean amount of time spent by the crews was distributed in (see Table 10-57): 9.70% (scenario 1), 11.08% (scenario 2) and 9.25 % (scenario 3). In the scenario 2, all reactor operators spent longer than 11% of the available scenario time. In fact, the scenario 2 was the less complex (with a limited automation) and only three disturbances were introduced: a trap alarm, the trip of a turbine and a steam line leakage outside containment, which was successfully detected and isolated by all the crews.

An important factor to consider is that all scenarios lead to a reactor scram, to prevent core damage and ensure safety; in some scenarios the reactor was automatically shutdown and in others the trip of reactor was a manual action of the operator. The reactor trip shuts down the plant in a few seconds. Following the scram, the operators have to follow the corresponding procedure, and check key operating parameters, such as the status of the control rods (all have to be inserted in the reactor core), reactor power level, pressure and the coolant temperature.

Further, the simulator study was comprised of several disturbances, with complicated situations and presented in a brief time frame; therefore, a small amount of time was without abnormal events and alarms.

Another aspect to take into account is that it should be clarified that the raw alarm data only belong to the alarm system, but additionally that, alarm information is also provided in the rest of HSI. For example, the alarm information is "embedded" in the large screen overview display, in the trends and in the process formats. Our prediction is that, most probably, this would increase somehow the time that operators spend for extracting alarm information from the control room interface.

In human factors, in simulator studies, the analysis of physiological data is costly and time-consuming; a usual approach is to determine representative periods in order to accomplish the research objectives. Different periods of every scenario were selected for scoring the eye movement data in all the AOIs which represent the HSI of the control room in the simulator. The detailed analysis was performed for specific periods representing alarm-related criteria (see 9.4.2.2.3). The selected periods have a duration of 29 and a half minutes in the first scenario (from the minute 5:30 to 35), 26 minutes in the second scenario (from the minute 4 to 30), and 27 minutes in the third scenario (from the minute 8 to 35). The findings indicate that there are four main sources of information that operators often used

during the selected periods of the scenarios: the process formats, the large screen overview, the trends (time-based data curves) and the alarm system (see from Figures 10-9 to 10-14).

The allocated visual activity in these four information sources explained the 85.82% of the crews' visual accesses in the selected periods of the scenarios (in scenario 1: 87.09%, in scenario 2: 85.55%, and in scenario 3: 84.82%). Figures 10-17 and 10-18 exhibit the average number of visual accesses of reactor and turbine operators, respectively. The four information sources also explained the 90.84% of the time spent by the crews in the selected periods of the scenarios (in scenario 1: 91.03%, in scenario 2: 90.19%, and in scenario 3: 91.29%). Figures 10-19 and 10-20 present the average proportion of time of reactor and turbine operators, respectively. The proportion of visual activity distribution of the reactor and turbine operators dedicated to the four information sources along the three scenarios is included from Figure 10-21 to Figure 10-26. "People have a tendency to fixate most on those areas that contain the most information" (Wickens, 1992, p. 81). As stated by Ha and Seong (2014, p. 766) "operators are expected to look longer and more frequently at more important and more informative information sources during operations." Nevertheless, Moray and Rotenberg (1989, p. 1340) found evidence that "during fault management there is a change in the proportion of time spent on looking at the failed subsystem compared with the rest of the system, but this occurs through more frequent looks, not through longer fixations", this is, the dwell times were unchanged.

The average proportion of time spent was approximately the 48% in the NORS process format, 20% of the large screen overview, 12% of the trends, and 11% of alarms (see Figure 10-16). The turbine operators spent a larger proportion of time in the process formats and in the large screen overview display than the reactor operators (see Figures 10-19 and 10-20). The large screen overview was used in part as a communication tools for decision making of the crews during the scenarios. The trends played an important role during the disturbances; both the trend line and numerical value of the trend were relevant. Overview trends reproduce trends of the reference plant. Several authors (e.g., Bennett, Payne, & Walters, 2005; Brown et al., 2000; Davey, 2000; Hajdukiewicz & Wu, 2004; Henningsen & Kemmerer, 1993; Mumaw et al., 2000; Roth & O'Hara, 2002; Roth et al., 1997; Vicente, 2007; Vicente et al., 1997, 2001; Yin, Tan, & Helander, 2008) point that operators monitor trends (with time) to anticipate potential problems, to facilitate disturbance detection and to diagnose process faults, before any event occurs. J. T. Kim et al. (2001) and H. C. Lee et al. (1998) also observed that, after the key alarm was detected, operators used the trend graph of "plant parameters" to confirm the plant status.

It was also found that operators made a relatively small number of control actions in response to the alarms (see 10.1.4.2, 10.14.3 and Appendix F timeline description and main crew actions in the scenarios), with variability among the crews, what conforms to previous investigations (e.g., Best et al., 1985; Bransby, 2000; Connelly, 1997; Friedman-Berg & Allendoerfer, 2008; Koene & Vedam, 2000; Kragt & Bonten, 1983; Moray & Rotenberg, 1989; Mumaw et al., 2000; Rothenberg, 2009; Vicente & Burns, 1995). Moray and Rotenberg (1989, p. 1319) stated that "operators spend long periods merely observing the system, only occasionally intervening to trim it." Kragt and Bonten (1983), in a fertilizer plant, found only a 7.5% of alarms were followed by operator action. In the nuclear domain, Mumaw et al. (2000) identified that many alarms did not require operator action (around 50% of alarms were not meaningful).

Two of the hypotheses (second and third) were in relation to the detection time of the alarm and the diagnosis of the disturbance. The hypotheses were formulated by considering the basic design principles of an alarm system, specially the alert function.

The design of an effective alarm system starts with a clear definition of what is an alarm. The state of the art presented in the chapter 3 provides a variety of definitions and approaches, therefore, a lack of consensus between them. Notwithstanding, many of the conceptual approaches stand out that, in general, an alarm is often used to alert the operator and draw the attention to a process or system deviation, which require an operator response (e.g., Bransby, 1998b; Bransby & Jenkinson, 1998a; Chériaux et al., 2010, 2011; EEMUA, 1999; EPRI, 2006; IEC, 2004; Jang, Keum, et al., 2008; H. C. Lee et al., 1998; NPD, 2001; O'Hara & Brown, 1991; O'Hara, Higgins, Brown, & Fink, 2008).

In designing alarm systems, the four functional criteria defined by Rankin et al. (1983): alert (a deviation exists), inform (the priority and nature of the deviation), guide (the operator response to the deviation) and confirm (if the operator response corrected the deviation), are highly relevant, and have been referred by many authors (e.g., Brown et al., 2000; Bye, Kårstad, et al., 1992; Bye & Moum, 1996; DeVries, 2010; EPRI, 2004a; Førdestrømmen et al., 1994; IAEA, 2001; Jönsson et al., 2004; NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994; Shimada et al., 1996; Sørenssen et al., 2002; Thunberg & Osvalder, 2007a, 2007b). Nonetheless, Rankin et al. (1983) did not expect the criteria being satisfied to the same degree, and argue that are best able to alert and to inform. In the design of CASH alarm system, the four functional criteria defined by Rankin et al. (1983) were considered (Førdestrømmen et al., 1994).

The displayed alarms in the CASH system are easily detectable by visual and audible annunciation. We found that the detection time was smaller when an alarm message pointed out the operators towards the main fault in the transients (see Table 10-59), but, beyond, in some few malfunction, the crews presented immediately detection time if an associated alarm was not implemented in the alarm system (see Table 10-61). Further, all crews detected the malfunctions indicated by an alarm message. Therefore, the assumption on the relevance of the alarm message indicating the malfunction was borne out by the results. Previous research found that operators seem to rely extensively on the alarm screens to detect problems (Mumaw et al., 2000).

In addition, the detection and diagnose of thirteen disturbances in the scenarios was performed successfully by all crews, with the exception of two crews failing to detect one disturbance of the thirteen implemented in the experiment. However, not all crews implemented the corrective actions (handle the disturbances) within the available scenario time, since some parameter conditions of the process were not reached. In relation to operator performance in the study, Hollnagel and Miberg (1999) found that operator performance score was slightly higher in scenario 3 than in scenario 2. The scenario 1 received markedly lower performance score than the low complexity scenarios as well. The operator workload was higher in high complexity scenarios (scenarios 1 and 3) than in low complexity scenarios (scenario 2), and the difference was wider in the scenarios with limited automation (scenarios 2 and 3).

Initially, some clarifications on the HSI control room characteristics, which may influence in the findings (i.e., the time spent on detecting and diagnosing some of the disturbances, interaction with the process, operators' actions, etc.) are presented. The HSI control room of the reference plant is a hybrid solution, while the interface of the NORS simulator represents an advanced computerized

control room. The HSI is completely replaced, from hardwired panel presentation to VDU based. As a consequence, several possible reasons could help to clarify the results on the time need for detecting the open position of the spray valve YP11S001 in the cooling down line for the pressurizer (scenario 3) or the opening of the turbine bypass valve RC51S003 (scenario 3). First, the familiarity level with the interface design (presentation of components, systems, etc.), and with the interactions on the NORS simulator HSI (the component handling is different in simulator and in the reference plant). Second, training on the interface was provided to support the knowledge of the HSI design in the NORS simulator. The operators generally reported feeling comfortable with the interface (Sebok et al., 1999), but this leads to the recurrent question of “how much training is needed, not only for familiarization, however, for getting to know the interface?” In the experiments, there is a shortage of time for extensive training. Third, not all components and systems are simulated in NORS. Therefore, the appropriate actions in simulator may somehow differ from the required actions in the reference plant.

All crews had difficulties to detect that the spray valve YP11S001 was left open by mistake. It was implemented from the start of the scenario, as a human error by the former shift. The reactor operators monitored around the area of the spray valve in the process format, but did not immediately detect the position of the valve. The opening of the valve YP11S001 was detected, at the earliest, when the valve YP11S003 (in spray line for cooling down of pressurizer) opened ten minutes later. In fact, the two disturbances were related, being that both valves belong to the same system (see Figure 10-27). Therefore, operators were, in a way, alerted, informed and guided to find the previous disturbance in the deviated plant system.

Further, the crew did not detect the opening of a turbine bypass valve could be because of, at least, three possible arguments. Most probably, the leakage due to the opening of the turbine bypass valve may be hidden by the leakage outside containment, and also, by some crew members concentrated in another system⁷¹. This is related to the scenario design: process conditions (other transients) may influence in operator attention, diagnosis and problem solving of a given disturbance. The operator may ignore information which is available, and show *cognitive tunnel vision*, focusing on some variables to the exclusion of others (Moray, 1981; Moray & Rotenberg, 1989; Sheridan, 1981). The results of Moray and Rotenberg (1989, p. 1334-1335) indicate that “thus operators will tend to be poor at the detection of sequential faults, since their absorption with the fault first detected greatly reduces the time and the frequency of observation that they devote to other parts of the system.” In addition, Moray and Rotenberg (1989) found evidence for a preference for serial fault management: the operator who deals with a fault and wishes to solve the current disturbance before starting a new one. The operators prefer to deal with faults serially rather than concurrently. Last, another plausible argumentation is that the scenario 3 was the first of the experimental run plan of that crew. As a consequence of the crew not detecting the opening of the bypass valve, a different solution of the defined ideal scenario path was chosen.

⁷¹ The time-line of events (i.e., the sequence of actions and events over time) relates that the transient was implemented short time after the crew detected the opening of the valves of the pressurizer system. When the turbine bypass valve opened automatically, the turbine operator and the shift supervisor were working on the feedwater system. Subsequent, with the turbine bypass in open position, a steam leakage occurred related to the feedwater system.

The research question in the fourth hypothesis formulated that crews will make use of all information sources of the HSI for detecting the abnormal events, but the alarm list (see Figures 9-10 and 9-11) is more often used.

The alarm list and alarm tile (or tile-like display) present similar information, this last one in a graphic format (includes symbols) and text information. The tiles emulate conventional tile alarms on VDU displays (see Figures 9-8 and 9-9). However, only key alarms are included in the two alarm tile displays, and the key alarms are also included in the alarm list. The operator's comment was fine that the key alarms are displayed twice in the system (Moum et al., 1998). Crews may use the redundant information to enhance performance in certain circumstances.

We found that alarm list was the main information source, not the only one, employed by the crews for detecting the disturbances (see Figure 10-30). Some issues to be considered for explaining the results are as following:

- Highlighting, operators have available two chronological alarm lists (primary and secondary side) in the control room of the reference plant (Moum et al., 1998); therefore, the crews are very accustomed to alarm lists in their daily work in many years. Nevertheless, most operators prefer split the alarm list in the operator position, since help in the alarm identification task, by reducing the number of alarms and enhance the relevance of the disturbance in the side of the plant (Moum et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000). In contrast, in the HSI of many conventional control rooms of NPPs, the main media to present alarms is exclusively based on hardwired panels of annunciators.
- In advanced designs of the control room, all information is provided through computer-based presentations, eliminating the common problem of alarm list of not located near all the control and display devices. This difficulty in the integration of alarm system presented in advanced and conventional technology was referred in the simulator studies of Torralba et al. (1997), and Torralba and Zamora (1997, 2000a, 2000b).
- The SDCV⁷² displays, as the alarm tile, allows by a glance see if there are any active alarms and provide pattern recognition features helping in the diagnosis of the situation. In spite of this, operators need training on the display features and time for interacting with the plant process to learn locating the alarms, since the alarm tile used in this study was a new design, not habitual to operators. Nonetheless, the operators preferred the tiles compared to the conventional tiles in the reference plant (Moum et al., 1998).
- It should be considered that some minor improvement in the usability of alarm tiles were suggested by Sebok et al. (1999), related mainly to the location of tiles within groups, order of alarm level information, lines to distinguish functional groups, crowded symbols and text and inconsistent abbreviations, as included in Table 8-4.
- A different amount of alarms are presented in the alarm list and alarm tile, since only key alarms are shown in the alarm tile of the alarm system. Our consideration is that this fact of not including all alarms in the alarm tile screen may have influenced in the larger use of the alarm list.

⁷² Spatially-dedicated, continuously visible (SDCV) alarm display is in a spatially dedicated fixed position and always visible (i.e., parallel presentation method is used) whether in an alarmed or cleared state. An example is the alarm tiles (O'Hara et al., 1994).

- Another important aspect is the timing of events. Most of the disturbances with an associated alarm message happened in the first third of scenario time, when the number of new incoming and active alarm messages was somehow lower. Operators commented that “they used the lists for the first occurring alarms. The lists are important for diagnosing the initiating event”, and also that “when there were many alarms, the operators used the tiles more and the lists less” (Moum et al., 1998, p. 11).

On the other hand, in many malfunctions with an associated alarm message, the operators determined the existence of abnormality in the HSI with a relatively low variability between crews (see Figure 10-31). This is, the operators exhibited preferences to select as primary information source a given alarm display in some transients, i.e., in function of the abnormality type (e.g., the trip of the high capacity boron pump in the alarm tile versus reactor scram and turbine trip in the alarm list). In this sense, a research question of the study is related with the existence of systematic pattern of operators for detecting some malfunctions in a specific screen. The alarm system served also a feedback function, as explained in the discussion of the fifth hypothesis.

Previous results indicate that operators often prefer conventional hardwired alarms on tiles, displays SDCV, which have shown advantages in conditions of high density of alarms and enhance early detection and pattern recognition (Brown et al., 2000; EPRI, 2003e, 2005; Fink et al., 1992; Kragt, 1984; Kragt & Bonten, 1983; Matsushita et al., 1988; Moum et al., 1998; MPR Associates, 1985, 1988; O’Hara, 1996; O’Hara & Brown, 1991; O’Hara et al., 1994, 1998; O’Hara, Brown, et al., 1994, 2000; O’Hara, Brown, Lewis, & Persensky, 2002b; O’Hara, Higgins, Brown, & Fink, 2008; Persensky et al., 2010; Roth & O’Hara, 2002; Vicente, 1996).

In spite of that, O’Hara, Brown, et al. (2000, p. 44) clarify, in the results of a simulator experiment in the HAMMLAB facility, that “operators also indicated that their preference for the best display type depends on the type of disturbance (and number of alarms). When the disturbance was simple and there were few alarms, the message list was fine, but when the number of alarms was high, the tile display was better.” Moum et al. (1998) found the same, as mentioned above, the authors explained that “in situations with many alarms, the key alarms are sorted out and can easily be scanned for new alarms” (Moum et al., 1998, p. 13).

Related to all the previous findings, we have not collected data on the operators’ preferences in relation to the alarm presentation media, since in this study interviews with the participants were not carried out. Our results are referred to data on eye movement and fixations in the areas of interest of the alarm system, and there could be a mismatch between operators’ preferences and the information source used in detecting. Supporting this, the results of an alarm experiment in HAMMLAB (Brown et al., 2000; O’Hara, Brown, et al., 2000) found that the effect of varying the alarm displays were modest, even with clear preferences of the operators for SDCV alarm display.

To continue explaining the results related to alarm list versus alarm tile, the ninth and tenth hypotheses deal with the fixation frequency and duration, based on the analysis of the visual activity of the operators, on the alarm screens, the findings are summarized in here. Two hypotheses are formulated in the use of alarm list versus alarm tile: the number of visual accesses and the percentage of time of the operators at the alarm tile will be statistically significant smaller than to the alarm list.

The hypotheses are corroborated. The descriptive statistics and ANOVA tests resulted in that the number of visual accesses and the proportion of time gazing at the alarm list reach higher scores

than the alarm tile in every scenario and for both operators type (see Tables 10-143 and 10-158). In all three scenarios, statistically significant results of the fixation number ($p = .027$ in scenario 1, $p = .001$ in scenario 2, and $p = .004$ in scenario 3) and the fixation duration on alarm AOI ($p = .002$ in scenario 1, $p < .001$ in scenarios 2 and 3) occurred. Moreover, statistically significant differences of the operator role are detected in the scenarios 2 and 3 in alarm frequency data ($p = .001$ and $p = .038$, respectively) and in alarm duration data ($p = .001$ and $p = .011$, respectively; also a tendency in scenario 1 $p = .056$).

These results of both frequency and duration data of the alarm tile are lower than of the alarm list were expected. Operators need less time to read the alarm tile, even because of pattern recognition not need to read the text. Only key alarms are in the alarm tile, a quiet reduced amount in comparison with the alarms presented in the list. The alarm list includes additional alarm information (e.g., the alarm sequence or the alarm parameter value) that requires expending attention resources. The alarms are hidden in an alarm queue when one page is fulfilled. The rate at which alarms appear in the list is important for allowing operators to read and evaluate the messages. The difficulty of information extraction influences the fixation dwells (Wickens, 1992): “displays that are less legible or contain denser information will be fixated on longer” (Mackworth, 1976 cited in Wickens, 1992, p. 83).

When considering the correlations between the AOIs of the alarm tile and alarm list, we found that are highly correlated in the frequency data of the turbine operators in the scenarios 1, 2 and 3, respectively ($r(4) = .813$, $p < .05$ (table 10-32); $r(4) = .829$, $p < .05$ (table 10-34); and $r(4) = .980$, $p < .001$ (table 10-36)), and across scenarios with $r(4) = .913$, $p < .05$ (table 10-24). At the crew level, the frequency data of two alarm AOIs across scenarios were $r(10) = .835$, $p < .001$ (table 10-22); within scenarios, in scenario 1, the frequency was $r(10) = .604$, $p < .05$ (table 10-26); in scenario 2, frequency of $r(10) = .876$, $p < .001$ (table 10-28) and duration of $r(10) = .714$, $p < .01$ (table 10-29); in scenario 3, frequency of $r(10) = .903$, $p < .001$ (table 10-30) and duration of $r(10) = .716$, $p < .01$ (table 10-31).

Up to here, the results concern the proportion of time and how frequently the operators gaze at the alarm displays during the total scenario time. Furthermore, the visual activity in the alarm tile versus the alarm list was explored for each scenario period (see 10.3.2.2 for a description of the scenario periods). With significance testing alpha level, set at $p < .10$ for ANOVA analyses, a lower amount of significant effects of the alarm list versus the alarm tile were in the number of fixations (8 effects in scenario 1, 14 effects in scenario 2, and 7 effects in scenario 3) than in the fixation duration (20 effects in scenarios 1 and 2, and 17 effects in scenario 3). In all statistically significant results along the scenario periods, the operators gazed in more occasions, and for a larger time, to the alarm list than the alarm tile. Further, if five alarm AOIs are considered along the scenarios, there is more periods with significant effects in ANOVA analyses with the five alarm AOIs than with two alarm AOIs.

Before exploring the next hypothesis, we present a summary of the recommendations of previous research on the configuration of the alarm system presentation. Xiao and Seagull (1999, p. 256) established that “designers of human-machine interfaces have long adopted the practice of attaching alarms of various types to displays and devices. In many senses such practice is well-intended: it aims at well-known limitations in human performance, such as limited attention spans and difficulties in tracking many parameters.”

Fink et al. (1992, p. 330) concluded that “the characteristic features of both technologies tested, the traditional window box and the CRT alarm display, have important roles to play in supporting the operating crew of a modern nuclear power plant control room. Furthermore, the success of either type of display will depend on its detailed design and implementation. One of the conclusions from the testing is that specific design details can have a significant effect on alarm system usability and usefulness.”

Stanton (1991, 1992, 1994a) and Stanton and Stammers (1998) recommend to match the displays formats to the tasks: the annunciators for tasks that require patterns of alarms to be identified, the text messages for tasks requiring presentation of sequential information, and embedded mimic alarms for the tasks that require spatial reference.

Brown et al. (2000) and O’Hara, Brown, et al. (2000) suggested that the alarm displays are composed of alarm tiles (SDCV), alarm message lists, and alarms integrated into process monitoring displays. Moum et al. (1998) describe that the final configuration of the alarm system for HAMMLAB experimental control room was chosen afterwards the alarm experiment carried out by U.S NRC in the HAMMLAB facility (O’Hara, Brown, et al., 2000). The alarm system consisted of two alarm list displays (primary and secondary side), two tile displays (primary and secondary side) to show key alarm tiles, and all alarms are integrated in the process formats. This is the alarm system used as a referent in this research. Each of the presentation elements have advantages and disadvantages, as explained in the chapter 7 related to a detailed review of the literature on alarm systems in NPPs. Special care should be taken to obtain a transition easily and rapidly between the alarm displays, by considering the human factors principles in the display design.

The alarm lists per se have received many criticisms, and is not recommended as the unique presentation media in the control room (e.g., Brown et al., 2000; Fink et al., 1992; Kragt, 1983, 1984; J. W. Lee et al., 2010; Matsushita et al., 1988; Moum et al., 1998; O’Hara, Brown et al., 2000; Roth & O’Hara, 2002; Stanton, 1991, 1992, 1994a; Stanton & Stammers, 1998; Torralba & Zamora, 1997, 2000a, 2000b; Torralba et al., 1997). In fact, previous findings suggest that the list is used as a complement to the alarm tiles (SDCV) displays. The best presentation strategy for Larsson (2007) and Larsson et al. (2006) is to combine alarm lists with alarm presentation in process schematics.

Some examples of statements related to the alarm list are “One single type of ‘alarm’ information on VDU should be avoided. A plea is made to consider both simultaneous and sequential presentation in the development of new systems” (Kragt, 1983, p. 44; Kragt, 1984, p. 927). “With the continued drive to replace traditional annunciator panels and wall-based mimics with VDUs in control rooms, there is good reason to question the use of text-based alarm displays” (Stanton & Baber, 1995, p. 2429). “The alarm list is far from ideal. It dates back from the line printer times, and is designed as much for documentation as for real-time use” (Larsson, 2007, p. 3(6)).

It is considered a fact in the control room that operators have a short available time to navigate in the alarm list during disturbances. In the study, it was observed that the operators showed a reluctance to carry out many interface management tasks (see 10.1.4 and Appendices D and F), same results are reported by Brown et al. (2000), O’Hara et al. (1998), O’Hara, Brown, et al. (2000), O’Hara, Brown, Lewis and Persensky (2002a), and Roth and O’Hara (2002).

Summarizing, what seems clear from the literature review and the results of the research is that a combination of media is required for alarm presentation, to support the functions of the alarm

system and the information needs of the operators. Our design recommendation favors a combined design of alarm tiles and alarm list, supported with all the alarm information in the process displays. Our findings suggest that the two presentation media are complementary. Further work could explore how combine and complement the presentation of information on spatially-dedicated, continuously visible alarm display, parallel presentation method, alarm tiles with variable physical location and sequential presentation of alarm messages on a chronological alarm list. Special efforts concern to support the specific design features of each display type and an easy transition between the presentation media.

Considering also future work, research on the content of the alarm message, and on how to present it, is needed to improve the information of the alarm lists.

Another proposal is to extend the data analyses for including *scanpaths* of the information used during the scenarios. To explore, for example, if there is a relationship between the location of the format that operators gaze before and after observing the alarm screens, and the location of the alarm list/tile (i.e., if the alarm list or tile is above or close to the display that the operators monitor, before changing the fixation to the alarm display; the alarm lists in the control room were closer to the large screen overview display than the alarm tile displays).

In the study, the alarm window did not cover all alarms presented in a conventional control room, since only key alarms were included (less than approximately 75% of the alarms usually present in a NPP control room). Therefore, an option could be extending the research to a conventional NPP simulator, in where all alarms are exhibited in the annunciators.

Concerning the fifth hypothesis, the diverse roles or functions of the alarm system were explored through the usage of alarm system along the scenarios in a simulator.

Our findings are consistent, at least in part, with previous evidence on diverse roles and functions of the alarm system (see chapters 3, 7 and 8) (e.g., Kragt, 1983; Kragt & Bonten, 1983; Niwa & Hollnagel, 2001; O'Hara, Brown, et al., 2000; Skraaning & Andresen, 1999; Stanton, 1995, 1996a; Stanton & Baber, 1995; Stanton & Stammers, 1998; Vicente 1996; Vicente & Burns, 1995).

The amount of time spent in the alarm areas of interest indicate that the operators gazed at the alarm system in the different phases of all the scenarios, for monitoring, detection, decision making and response implementation (see Figures 10-32, 10-35 and 10-38). Alarm calls operators' attention with visual indication and audible tone, but, even so, without announcing an alarm, the operators observed the alarm system.

Accordingly, our findings indicate that the alarm system plays a multi-faceted role. It is used during the detection stage (one of main functions of the alarm system: a first alerting to an anomaly). However, it also guides the operator in activities for situation assessment, response planning, and response implementation. Less time is allocated to the alarm system during the monitoring phase. Skraaning and Andresen' simulator study (1999) found that the alarm system was used 1% of time in the monitoring phase, 11.9% in detection, and 7.6% in the problem solving phase.

The alarm system was used with a confirmatory role as well, e.g., the operators do detect the disturbance in the process formats, and afterwards, search for information at one of the alarm system screens. Beyond, operators look for alarm information at both alarm displays (alarm tile and list) consecutively. This was also found by J. T. Kim et al. (2001), H. C. Lee et al. (1998), Torralba et al.

(1997), and Torralba and Zamora (1997, 2000a, 2000b). This behavior is related to a double-checking of information (data): the crews verify the alarm information from a second information source to validate the existing information. The evidence is also based on the high correlations between the alarm tile and alarm list, especially in the number of visual accesses to the AOIs. Future work could explore whether the number of visual accesses depends on the number of active alarms and the timing of the new alarms, and if there is a pattern on using any of the alarm displays (i.e., scanpaths), for example, the operator attends to the alarm value AOI, or to the alarm text, afterwards of looking at the alarm tile.

We also observed that the alarm system was used as a feedback tool of certain operator actions, to support maintenance of the knowledge of the process status. This feedback function on the success of operator's actions is also described by Brown et al. (2000), Kragt (1983), Kragt and Bonten (1983), Lees (1983), Niwa and Hollnagel (2001), O'Hara and Brown (1991), O'Hara, Higgins, Brown, and Fink (2008), Persensky et al. (2010), Usher and Stallard (1997), Vicente (1996) and Vicente and Burns (1995). We refer to this evidence later on regarding with the anticipation of alarms by the operating team.

Previous field studies in normal operation, carried out in a conventional alarm system in a fertilizer plant (Kragt, 1983; Kragt & Bonten, 1983) and in nuclear power plants (Vicente 1996; Vicente & Burns, 1995), have demonstrated that alarm systems are used by operators for diverse operational purposes. Some of the purposes, in addition to detect anomalies, include determination of the status of components or systems, feedback of operators' actions, confirmation of the occurrence of an expected event, and determination of the time to perform a given action (Kragt, 1983; Kragt & Bonten, 1983; Vicente, 1996; Vicente & Burns, 1995). "In fact, one could even say that to some extent, they use the alarm screens to get an overview of plant status" (Mumaw et al., 2000, p. 52). However, as Vicente (1996) argues, the field studies observed the use of alarms over short periods and in routine day-to-day work, rather than during plant failures.

Alarm systems are used for many purposes that are not associated with off normal (abnormal) events, and alarms cover other functions than alerting. Alarm system often plays another role than originally planned or anticipated by the designers (Beattie et al., 1996; Brown et al., 2000; Kragt, 1983; Kragt & Bonten, 1983; Moum et al., 1998; Mumaw et al., 2000; Niwa & Hollnagel, 2001; NRC, 1996; O'Hara, Brown, et al., 1994; Stubler, O'Hara, Higgins, & Kramer, 2000; Vicente, 1996; Vicente & Burns, 1995; Vicente et al., 1997).

Operators use alarms to monitor plant status and detect problems requiring action (Chériaux et al., 2010, 2011; EPRI, 2006; Moum et al., 1998; O'Hara, Brown, et al., 2000) or attention⁷³ from the operator (Moum et al., 1998). In fact, many authors highlight the monitoring of the plant (i.e., monitoring the changes in the process) during normal operation, helping operators to update the status of the plant (Bagchi & Gottilla, 1981; Beattie et al., 1996; Chériaux et al., 2010, 2011; Davey, 2000; De Keyser & Nyssen, 2001; EPRI, 2006; Kragt, 1983; Kragt & Bonten, 1983; Mumaw et al., 2000; Niwa & Hollnagel, 2001; Vicente, 1996, 2007; Vicente & Burns, 1995⁷⁴; Vicente et al., 1997, 2001). The findings of the field study conducted by Kragt (1983, p. 28, p. 39) and Kragt

⁷³ These alarms have the lowest priority (Moum et al., 1998).

⁷⁴ The study of Vicente and Burns (1995) was not focused exclusively on alarms, but the results show a very prominent role of alarm system in operator cognitive monitoring (Vicente, 1996).

and Bonten (1983, p. 586, p. 597) indicated that the alarm system was mainly used “as a monitoring tool and not as an alarm system requiring action.”

Monitoring during normal operations is not a passive task (Mumaw et al., 2000; Roth et al., 1997; Vicente et al., 2004; Xiao & Seagull, 1999), i.e., operators proactively monitor some key process parameters of the plant to early detect deviations and maintain their awareness of the current state of the process (e.g., Alm & Osvalder, 2012; Jönsson & Osvalder, 2005; Mumaw et al., 2000; Osvalder & Alm, 2011; Roth et al., 1997; Stanton, 1994; Thunberg & Osvalder, 2007b, 2009; Vicente, 2007; Vicente & Burns, 1995; Vicente et al., 1997, 2001). “Instead of continuously monitoring the plant ..., operators frequently rely on the alarm system to bring their attention to goal-relevant events” (Vicente, 1996, p. 13). Mumaw et al. (2000), Roth et al. (1997), Vicente (2007) and Vicente et al. (1997, 2001) observed that operators modified the interface to support monitoring under normal operating conditions, such as create alarm, that did not exist before, to the purpose of when an important deviation occurs.

During the study, we also detected that operators anticipate some alarms. Clear examples are found on the manual startup or trip of the high capacity boron pump, reactor scram, trip of the turbine, and some actions to isolate some components because of a leakage. Operators observed the alarm screens for the incoming alarms. The finding is consistent with results from other studies: operators do not only respond to alarms but also anticipate them (De Keyser & Nyssen, 2001; Niwa & Hollnagel, 2001; Stanton, 1995, 1996a; Stanton & Baber, 1995; Stanton & Stammers, 1998), and continually adjust their performance to balance demands and capabilities (Niwa & Hollnagel, 2001).

As earlier explained, the allocated time to the alarm information seems to depend on the scenario phase and the scenario type. For explaining in detail the information processing activities of the operators and the operators’ actions, a qualitative analysis of the crew activities in every scenario needs to be considered. The findings are included in Appendix F titled: timeline description and main crew actions in the scenarios.

Regarding the sixth hypothesis, the focus was in the beginning of the anomaly during which the operator actions are particularly important, and a common problem is the existence of an alarm flood (i.e., alarms that occur in short a time frame). An estimation of an expert panel, from the Halden Project (Skraaning & Andresen, 1999), related to a quadratic trend in the use of alarm information with the appearance of disturbances during the detection phase, was explored.

The quadratic trends, i.e., first the increase and then the decrease of the visual activity in the alarms, occurred in periods of all three scenarios. The quadratic effects are shown in the number of visual accesses and in the amount of time spent on the alarm system (see Figures 10-41, 10-42 and 10-43). The curves of dwell time are slightly higher than those of the fixation number, and these data are highly correlated.

The quadratic trends correspond with the implementation of alarms indicating the cause (initiating event) of the simulated malfunction in the scenarios 1 and 2. Instead, in the scenario 3, the quadratic effect seems also to relate with highly important disturbances in the process, even if an alarm not explains the abnormality, some other alarms related with the symptoms are announced. For example, the decrease in pressure and an unexpected cooling down, when the control valve in the spray line of the pressurizer opens, if the operator has not previously observed the state of another spray valve.

Notwithstanding, it should be noted that different main effects are found during the scenario periods, i.e., the different stages of the transients. The implementation of several malfunctions in each scenario may contribute to explain various types of effects throughout the scenario. In fact, this indicates, again, the diverse use of the alarm system, as noted previously in the fifth hypothesis. Operators gaze at the alarm system, even if no new alarms are announced. In a simulator, the operator expects something to happen, i.e., events occur. Operators may look for feedback of their actions or use the alarm system as an alarm log. Most likely, operators have expectations on finding some active alarms to support diagnosing the event, as there are some symptoms.

In two hypotheses (seventh and eight), we explored the research question that the fixation number and the fixation duration data on the alarm AOIs are evenly distributed for all crews across three scenarios. We contemplated the AOIs of alarm system, alarm list, alarm tile, and the four alarm list AOIs (the alarm tag, alarm text, alarm value, and time and other parts of the alarm list).

Only one statistically significant result in the AOI of time and other parts of the alarm list was found ($p < .001$) (see Tables 10-92 and 10-95), in the direction that operators did more visual accesses in the scenario 2 compared with the scenarios 1 and 3. Some statistically significant reactor operator effects (see the summary Table 10-95) in the frequency data of alarm system ($p = .018$), alarm tile ($p = .007$), alarm list ($p = .052$), and time and other parts of alarm list AOIs ($p < .001$) occurred. Interaction effects also happened in the frequency data of alarm system ($p = .030$), alarm list ($p = .022$), and time and other parts of alarm list ($p = .002$), which are attributed to the reactor operators and scenario 2 effects (see Table 10-95).

Also a statistically significant effect indicated that the operators spent less percentage of time in the AOI of time and other parts of the alarm list in the scenario 1 than in the scenario 2 ($p = .002$) (see Tables 10-122 and 10-125). The reactor operators scored, statistically significant, higher in the duration data of the AOIs of alarm system ($p = .001$), alarm tile ($p = .001$), alarm list ($p = .014$), and time and other parts of the alarm list ($p = .001$) (Table 10-125). An interaction effect occurred in time and other parts of the alarm list ($p = .045$), because of the reactor operators and the scenario 2 (see Tables 10-122 and 10-125).

In summary, the findings point to some singularities in the operator usage of the alarm system, both in the frequency and duration data, in the scenario 2, as previously described. The design of second scenario represented a low complexity characteristic and a limited automation level. The findings seem to point towards a wider use of the alarm system in less complex scenarios, but this should be explored further, by adding scenarios with that characteristic (a low complexity). As well, it was noticed that the operators expected to happen something else, as the other scenarios did have more disturbances and the nature of the malfunctions had made the diagnosis more difficult. As was explained earlier, the reactor operators employed the alarm system more times and for a longer period than the turbine operators.

In the eleventh hypothesis, we tested the utilization of the alarm text versus alarm identification code (alarm tag), which are two AOIs of the alarm message in the alarm list. The alarm tag and the alarm text present information for identifying the alarm (see Tables 9-11 and 9-12). As described in the section of method (9.5.2.3.2), the alarm tag contains information regarding the origin of the alarm (the tag is composed of letters and numbers, with an eight or eleven character code, based on the type of signal), and often part of the code includes information of the NORS process display

(i.e., the process system) to which the operator can access (see an example of a tag in column 3 of Table 9-11).

The general finding is that, on average, a greater number of visual accesses and a larger amount of time were spent by the operators in the alarm text AOI than in the alarm tag in all three scenarios, including both levels of the crew and the operator position in the team (see summary Table 10-238). All the results are statistically significant ($p = .005$): between scenarios $p = .001$ in frequency, and $p < .001$ in duration; in scenario 1, $p = .005$ in frequency and $p = .002$ in duration; in scenarios 2 and 3, $p = .001$ in frequency and in duration.

Specifically a research question was formulated: the “highly experienced” operators will primarily read the alarm tag while the “less experienced” operators will mainly use the alarm text for identifying the alarm content. The formulation of the question was based on conversations with designers of the CASH alarm system and in the operators’ comment: “Alarm text is for beginners while alarm tag is for advanced operators” (Moum et al., 1998, p. 4). Even in an experiment (Moum et al., 1998), some operators suggested including the alarm tag⁷⁵ in the alarm text of the alarm tiles.

There are no statistically significant effects in the level of experience of the sample of operators. This means that the findings did not corroborate the hypothesis. Nevertheless, the operators with more experience tend, on average, to score higher in the alarm text than in the alarm tag. We also found, in the frequency and/or duration data of some operators, the alarm tag AOI reach a score higher or similar than the alarm text AOI. In addition, overall, it appears that the more experienced operators score higher than less experienced operators in the alarm tag.

The more experienced operators, apparently, tend to use the two alarm sources of information more evenly than the less experienced operators. Interaction effects, between the operational experience of the crew and the two alarm list AOIs, were detected in the frequency and duration data, because of the alarm text AOI and the less experienced operators, i.e., the less experienced operators show a considerably wider distance between the AOIs than those of the highly experienced operators (see summary Table 10-238; Figure 10-74 to 10-81).

We acknowledge that, in a way, it was established an “artificial” division of the experienced level of the subjects, because all operators were, in fact, highly experienced and well trained, as the minimum experience was at least four years (see Table 9-1). In fact, the average experience of the less experienced operators was 6.76 years, and the highly experienced operators of 21 years. The crews assumed the same duties and responsibilities as whether performing in the control room. In other comparative studies, based on operating experience, the participants were actual control room operators versus students or attendees to a training course of reactor (e.g., Huang et al., 2007).

Our recommendation is, therefore, the incorporation of the alarm identification code (alarm tag) and the alarm text in the alarm message of the alarm system, allowing to the operators configure the alarm message content based on their preferences and needs. In fact, actual work practices and the operation concept of the plant will influence in the design of the alarm system.

⁷⁵ Additionally, Moum et al. (1998) found discrepancies on the operators’ opinion about if the 11 characters of the identification tag should be used, or whether the first 8 characters are enough, most of the operators supported the last one.

Previous research (Moum et al., 1998) recommended include both the tag identification code and the text. NPD (2001) states that the message content should minimize the need of interpretation and memorization (information recall from long-term memory), and recommends in the design the descriptive information. The alarm message should include the alarm identifier and descriptive text, in between other information fields.

Going a little bit beyond the hypothesis, the number of fixations and the dwell time on the four AOIs of the alarm list and the alarm tile express clearly that the visual activity of the operators, in fact, is allocated to all the alarm system AOIs. The percentage of allocation of visual activity of the alarm system AOIs is, in decreasing order of frequency and duration, as follows (see Figures 10-1 and 10-2): alarm text (37% of frequency and 41% of duration), alarm tile (25% and 26%), alarm tag (18% and 16%), alarm value (11% and 9%), and time and other parts of the alarm list (9% and 8%). Accordingly, a similar mean percentage of alarm data distribution of frequency and duration occur.

Danchak (1980, 1982) investigated the information that NPP operators need in order to respond to an alarm, and found the most valuable were the indication of what the alarm is (denomination of parameter in alarm) and how serious is the alarm (current value and set point limit, severity and priority). We considered this as the minimum content of the CASH alarm system, in addition of the time of occurrence of the alarm and the NORS process format code (Førdestrømmen et al., 1994). The alarm messages should include, according to NPD (2001), the priority, alarm state (new, accepted, cleared), visual annunciator, alarm identifier, descriptive text, and severity. EEMUA (1999) recommends that each alarm in the alarm list show the alarm state, the priority, the alarm message, and time and date.

Alarm messages should not contain unnecessary information. Danchack (1980, 1982) questioned the usefulness of the time of occurrence and the date of occurrence. NPD (2001) considers optional the inclusion of the updated measurement value, the alarm limit and unit, date and time. EEMUA (1999) also considers optional the inclusion of the alarm value and alarm limit, and the alarm tag number. Nonetheless, operators need the time and date of occurrence at which alarms became active if the alarms stay longer than a day (e.g., Bransby & Jenkinson, 1998a; EEMUA, 1999; Moum et al., 1998; Shahriari et al., 2006).

The findings of our research lead to suggest the inclusion of all the four AOIs of the alarm list in the design of the alarm message content, as recommended in Moum et al. (1998, p. 20): “Alarm priority (as colour), visual annunciator, date, time, alarm tag, textual description, severity, current value, alarm limit, and engineering unit.” A redundant coding for the alarm priority, in addition to color code, in the alarm lists was suggested by Sebok et al. (1999), by adding a number according to alarm priority; the redundant coding was already included, for example, in a later alarm system development in the BWR simulator in HAMMLAB (e.g., Karlsson et al., 2002).

The twelfth and thirteenth hypotheses are related to the operators’ actions for alarm management or alarm handling. The operator actions on the CASH alarm system (interaction with the system) include acknowledgement, compression and silencing of the alarm.

The number of operator’ actions were investigated. We expected a higher number of silence actions than of alarm acknowledge or alarm compress. It was also explored if there was a pattern in the alarm handling actions across scenarios.

The findings indicate that the amount of actions, in a decreasing order, was: compress, silence and acknowledge (see Figure 10-82 and Table 10-16). Some clarifications of the general results are required. Firstly, in all scenarios, the smallest number of actions taken by the operators was of acknowledgment (i.e., operators prefer to leave the visual annunciator symbol in the list and the frame around each tile in a blinking state). Secondly, in the scenarios 1 and 2, the silence actions reach the highest values. Thirdly, in the scenario 1 was also observed a lower number of alarm handling actions, and that the reactor and turbine operators did a similar amount of actions, in contrast with the rest of scenarios. Finally, it should be noted that individual differences were observed in the alarm management actions of the members of the teams. For this reason, a qualitative analysis of operator's actions for alarm treatment is included in Appendix I, alarm handling actions for every crew in three scenarios.

It should be noted that operators could select the way of scrolling the alarm message list: automatic by the system or manual by operators. The default feature was maintained by all crews: automatic scroll when new alarms appear. The implication is that operators did not have to scroll to alarm pages out-of-view, as previous research found that operators were reluctant to scroll to unseen alarm pages (a secondary task), and most abandoned scrolling when workload became high (Brown et al., 2000; O'Hara, Brown, et al., 2000). On the contrary, the recommendation of human factors guidelines is that the method of adding alarm messages to the list should prevent from message auto-scrolling (Brown et al., 2000; O'Hara et al., 1994; O'Hara, Brown, Lewis, & Persensky, 2002b). This may explain, in part, the use of the compress feature (the deactivated alarms stay in white color in the list until it is compressed, i.e., the compression of alarms eliminates returned-to-normal alarms), the alarm list continuously auto-scrolls with the new incoming alarms.

The correlations between some alarm management actions apparently depend somehow in the operator position in the team (see Table 10-245). The highest correlations of the reactor operator actions are between silence and acknowledgment ($r(4) = .961$, $p < .01$), followed by silence and compress ($r(4) = .953$, $p < .01$) (note that the same occurs on average at the crew level, because of the reactor operator actions in the scenario 2). Instead, the actions of silence and compress ($r(4) = .914$, $p < .05$) for the turbine operators correlated with a higher score. The correlations between the alarm treatment actions increase, both between and within scenarios, if considered the occurrence of new alarms in the analyses.

The ANOVA analyses have not resulted in statistically significant effects between the alarm treatment actions (see Table 10-249), but found that the presentation of new alarms influence the alarm handling actions ($p = .002$ across scenarios). In fact, it was expected that the incoming alarms did modulate the operators' alarm handling actions, for satisfy their functionality.

Therefore, the results of the study seem to refer towards the operator preferences for the silence of alarms (i.e., reset the auditory alert of the alarm) and the compress of alarms (i.e., the deactivated alarms –named also no active, cleared, extinguished or returned to normal alarm– are removed from the alarm display; the compress action acts, in a way, as a manual reset function).

The meaning of an acknowledgment action is that the operator indicates a receipt of the message provided by the alarm system; an alarm which has been acknowledged became a steadied alarm. As previous authors have found, operators are aware of the importance of acknowledging alarms, but in practice many times the alarms stay without acceptance (Campbell Brown, 1998; EPRI,

2005; IEC, 2004; Lees, 1983; Shaw, 1993; Sørenssen et al., 2002; Stanton & Baber, 1995; Woods, 1985). Stanton and Baber (1995) found that the operators do not always accept alarms when they are announced, instead keeping the new alarms in their flashing state (unacknowledged) for distinguishing between new (unacknowledged) alarms and existing alarms (in a non-flashing state). This strategy works up to eight new annunciators, with more, they find difficulties in recalling the order of occurrence (i.e., lose the temporal distinction) (Stanton, 1992). Afterwards of this rate, the operators change their strategy to a global acknowledge of all new alarms (Stanton & Baber, 1995). Campbell Brown (1998) considers that the usefulness of the acknowledgement function is up to a rate of incoming alarms of less than 15 per minute, because, during alarms floods, the operators cannot read the text and understand the meaning before accepting it. The acknowledgement of many alarms is a time consuming task (IAEA, 2001). All these arguments may explain the use of the acknowledgment capability, highlighting that operators could keep the unacknowledged alarms to review them later, when the operating crew have time to deal with the alarms.

In the control rooms, operators may silence and/or acknowledge without attending to the alarm or without necessarily identifying the alarms that came in, as we described in chapter 5 on alarm system problems. Kinkade and Anderson (1984, p.170) state “on occasion, operators have been observed to silence and acknowledge alarms without looking at the annunciator panels”. EPRI (2003a, p. 1-1) and EPRI (2005, p. 3-1) state that the alarms “increase workload when the operators turn their attention back to the alarms to acknowledge them, silence the auditory warnings, and review the alarm information presented.” Further, even if operators have silenced or acknowledged the messages, do not mean that have read and assimilated the alarm message, what, in turn, may also delay the appropriate corrective actions. A “global silence” capability is recommended in EPRI (2005, p. 4-32) “to prevent audible distractions in situations when many alarms occur and the operators need time to perform required tasks prior to acknowledging and responding to the alarms.”

The SART (alarm controls) philosophy will likely apply to advanced alarm systems, and additional controls may be required for the additional features of the alarm system (Brown et al, 2000; EPRI, 2003b, 2003e, 2004a; O’Hara & Brown, 1991; O’Hara, Brown, Lewis, & Persensky, 2002b). We are not aware of much research on alarm controls, except, for example, a series of studies of Huang, et al. (2006, 2007) to compare alarm reset modes (automatic versus manual), in advanced control room, but in our study the compress feature was only kept in manual. As Brown et al. (2000), EPRI (2003b), and O’Hara, Higgins, Brown, and Fink (2008) indicate the control interfaces for advanced alarm systems have not been systematically investigated. The alarm handling actions need further research.

The hypothesis thirteenth refers to the use of individual operator’ actions (alarms from primary or secondary) for compress and acknowledge versus global (i.e., all alarms) alarm capabilities to compress and acknowledge.

We expected that for acknowledging and compressing alarms, operators will mainly do use of individual options –primary for reactor operators and secondary for turbine operators– instead of global (group) options. The global compress/acknowledge buttons, in fact, act simultaneously on the alarm displays of both operators.

The results corroborated the hypothesis (see Figures 10-83 and 10-84), with statistically significant findings across the three scenarios ($p = .022$ for acknowledge, and $p = .020$ for compress) and on a scenario basis (acknowledge: in scenario 1, $p = .015$; in scenario 2, $p = .051$, and in scenario

3, $p = .038$; compress: in scenario 1, $p = .010$; in scenario 2, $p = .052$, and in scenario 3, $p = .070$). A tendency to an operator effect was detected in the scenario 2, given as the reactor operators acknowledged ($p = .068$) and compressed ($p = .067$) the alarms more times than the turbine operators. Moum et al. (1998) also reported that most of the operators only acknowledged alarms on their own side. Stanton and Baber (1995) stated the literature was inconclusive.

Our recommendation to the designers of alarm system is allow all the possible interaction capabilities: global acknowledgement/compress of alarms, as well as each alarm could be individually acknowledge/compress. This was proposed by EEMUA (1999) and Moum et al. (1998) too. The button to acknowledge/compress all alarms can be used when the other operator is with the back panels, or out of the control room (Moum et al., 1998). And also use a separate button for alarm silence for each operator.

11.2 LIMITATIONS OF THE STUDY

This sub-section presents some of the limitations of the reserach. The definition of an appropriate level of analysis was based on AOIs, and the AOIs need to be defined ahead of time. Our initial idea was in capturing the transition of eye movement among all displays of the HSI, i.e., the dynamics of attention. A really broad scope!

In the following some limitations in the scoring process are referred. The calibration of the eye movement tracking videos was usually very good, with a mean score of about 7 in a 10 point scale. It is usually difficult to keep the calibration optimal in all scenario periods. Two operators were corrected to normal vision with glasses, which may have led to some effect on the calibration of the eye tracker equipment for long distances (i.e., mainly in relation to the large screen overview).

Specially, the large amount of AOIs defined in the study implied an arduous scoring process and increased the needed scoring time of the visual activity data. We also found that some of the defined AOIs were not scored easily and did not represent our original thoughts (e.g., the AOIs of procedures and communication).

The AOI “not specified or anything else”, in fact, comprises, between others, highly relevant data, operator’s actions in the HSI through the keyboard or mouse (i.e., the interactions with the process and the alarm handling actions), and the telephone calls. These operator actions were not observed clearly, very often, at the eye movement tracking videos. This explains why the AOI “not specified or anything else” reaches somehow unexpected high scores in some operators.

Normally, the eye movement tracking video was run at approximately half of actual speed, during the scoring process, as recommended by Andresen and Drøivoldsmo (2000), and Drøivoldsmo et al. (1998). In some few occasions, the tape was run at a lower speed or was rewound, because of the large number of AOIs. Generally, larger AOIs are scored faster and more reliably than small areas, as stated by Andresen and Drøivoldsmo (2000).

Another concern is related with the update rate of the screens of the HSI, mainly the large screen overview (e.g., the NORS simulator has an approximately 1.5 s cycle). It was observed that operators obtained information from the alarm system screens (tile or list), and expected a double-checking in the large screen overview, however, the alarm was still not shown in that screen. For

example, at starting up manually of the boron program, initially operators detect the alarm of the high capacity boron trip, and tried double-check in the large screen overview.

Among the study's limitations, one researcher did all the scoring of the visual activity. Therefore, inter-scorer reliability could not be considered for analysis. This means that the scoring procedures was done twice only for some participants by the same researcher.

This was a retrospective study of experimental data collected on an explorative study on human-centred automation. The implication is that could not be supplemented by further information from other sources, i.e., interact with the test subjects, operators, and collect data on the alarm system with additional methods, as interviews, debriefing and focus groups. However, notes and results from the main experiment were available and the conversations of the experimental sessions were recorded.

On the other hand, the experimental sample is limited due to the nature of the research and the participants: professional operators of the control room in a nuclear power plant in operation during data collection. The sample is, therefore, incidental in terms of availability of plant personnel, but participants represent the real population, unlike many studies using, for example, students or trainee-operators.

An aspect contributing to the validity of the study itself, the generalization of the findings, is the use of simulator, what is sometimes criticized. Simulators allow realistic scenarios and analyze the interaction of the interface and the crew. In the simulator, operators have to take actions to correct the malfunctions in the same way that would do in the control room of the reference plant. The study collected data of crew operating in a simulator, taking place outside the control room, which may have influenced certain variables of human performance. Some of the main limitations of simulator, formulated by O'Hara and Hall (1992), even when acknowledging that simulator data are extremely valuable, relate with the occurrence of very low probability events and the operator expects them – unlike the real world; the attention is aroused to the initial detection of problems; the interpretation of the situation is optimized for failure recognition; the response to the event will be enhanced; not raise conflicts between safety and productivity goals. Notwithstanding, as argue Hallbert, Sebok, and Morisseau (2000, p. 55) “Simulator studies, however, represent the best approximation of the actual control room environment, and are the environment in which crew performance is tested as part of licensing and requalification.” In any case, due to the nature of the study, the use of a simulator was a real need for manipulating the environment: the scenarios.

The way of presenting the information in the simulator and the control room is different, since the simulator represents a computerized and advanced control room consisting of video display unit-based information and control system, and the control room of the reference plant is a conventional hybrid design. Operators were trained in the interface, being as the HSI differs significantly. The PWR simulator implemented additional functionalities, new support systems and a large screen overview, not available at the plant. In relation to the alarm system configuration, in the control room is composed of hardwired panels and a computerized alarm system, which consist of two alarm lists, one for the alarms of first priority and one for second priority alarms. Therefore, it should be noted that operators participating in the study are accustomed to using the alarm lists in daily work.

Nevertheless, we assume that these limitations of the exploratory research not significantly influence in the possible extrapolation of the study results, but have to be noted.

11.3 FUTURE WORK

A roadmap of alarm system in control room is needed, most likely, to be defined as the essential future work outline. In here, instead, some of ideas are suggested based on the results of the study. Many enumerated research needs in this document still exist.

Some recommendations on future work for explaining the findings of this thesis have already been incorporated in the discussion of results, i.e., some possible extensions of work are already mentioned. In here, we expose a brief summary on the major issues.

Further analyses of the available data may be covered, specifically measures of scanpaths, series of fixations and saccades, in the eye movement data during the scenarios. The availability of modernized eye tracking equipment and of advanced data analysis software gives places at scoring process and data analysis faster (less time consuming) and accurate.

Another issue for further work is the use of the alarm system by the crew composition: the operator role. This has not been usually explored in previous research, as the data are commonly aggregated and analyzed at the crew level. Initially, we did not expect to find statistically significant differences between the reactor and turbine operators. Different competencies and responsibilities are assigned to the operators in the control room for maintain the safety and the productivity of the installation, those aspects related with reliability and availability of the plant.

Additionally, the extension of the study with adding some other experimental data may be considered. The visual activity data may be collected in advanced or conventional simulators, given that the eye tracking equipment could interfere with the normal activity if collected in a real control room. The results indicate, to some extent, a dependency in the scenario characteristics, mainly the complexity of the series of events. In the study, the experimental manipulations gave place to three scenarios design: high complexity and high automation, high complexity and low automation, and low complexity and high automation, i.e., each scenario represented one experimental condition. Hollnagel and Miberg (1999, p. 46) argue that “it was expected that the manipulations of the independent variables were forceful enough to manifest themselves in the experimental results, but future experiments are needed to clarify this question.”

Last, in a simulator of a conventional control room could be explored if the alarm system plays a somewhat different role than in an advanced control room because of the improved information system compared to that of conventional control rooms, as suggested by Brown et al. (2000), and O’Hara, Brown, et al. (2000).

12 REFERENCES

- Ahlstrom, V. (2003). *An initial survey of National Airspace System auditory alarm issues in terminal air traffic control* (DOT/FAA/CT-TN03/10). Atlantic City International Airport, NJ: Federal Aviation Administration (FAA), William J. Hughes Technical Center. Retrieved from FAA website: <http://hf.tc.faa.gov/technotes/dot-faa-ct-tn03-10.pdf>
- Ahmed, K., Izadi, I., Chen, T., Joe, D., & Burton, T. (2013). Similarity analysis of industrial alarm flood data. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(2), 452-457. doi: 10.1109/TASE.2012.2230627
- Alford, J. S. (2006). Bioprocess control: Advances and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, 30, 1464-1475. doi:10.1016/j.compchemeng.2006.05.039
- Alford, J. S., Kindervater, J., & Stankovich, R. (2005). Alarm management for regulated industries. *Chemical Engineering Progress*, 101(4), 25-30. Retrieved from http://web-post.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/wp_010_cep_alarmmgmt.pdf
- Alm, H., & Osvalder, A.-L. (2011). The alarm problem - The real problem? In J. Lindfors, M. Savolainen, & S. Väyrynen (Eds.), *Proceedings of 43rd Annual Conference of the Nordic Ergonomics Society* (NES2011) (pp. 419-422), September 18-21, 2011, Oulu, Finland. Retrieved from http://www.kotu.oulu.fi/nas2011/docs/Proceedings_NES2011_Oulu.pdf
- Alm, H., & Osvalder, A.-L. (2012). The alarm system and a possible way forward. *Work*, 41, 2840-2844. doi: 10.3233/WOR-2012-0532-2840
- American Gas Association. (2009). *Alarm management for control room operations in the natural gas industry* [White paper]. Retrieved from American Gas Association website: <http://www.aga.org/SiteCollectionDocuments/Committees/Gas%20Control/0912GCCAMWH ITEPAPER.PDF>
- American National Standards Institute. (1988). *American National Standard for human factors engineering of visual display terminal workstations* (ANSI/HFS 100-1988). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Andow, P. (1985). Alarm systems and alarm analysis. Diagnosis of the cause of alarms and other abnormal indications is an important component of the operator's job. *Plant/Operations Progress*, 4(2), 116-119. doi: 10.1002/prsb.720040213
- Andow, P. (1997). Abnormal situation management: A major US programme to improve management of abnormal situations. *IEE Colloquium on "Stemming the Alarm Flood"* (pp. 3/1-3/4), June 17, 1997, London. doi: 10.1049/ic:19970741
- Andresen, G., & Drøivoldsmo, A. (2000). *Human performance assessment: Methods and measures* (HPR-353). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Bagchi, C. N., & Gottilla, S. C. (1981). Application of human engineering criteria to annunciator display systems in a large fossil power station. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (PAS-100), 6, 2759-2765. doi: 10.1109/TPAS.1981.316389
- Bainbridge, L. (1997). The change in concepts needed to account for human behavior in complex dynamic tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 27(3), 351-359. doi: 10.1109/3468.568743

- Baker, J. A., Bowman, F. L., Erwin, G., Gorton, S., Hendershot, D., Leveson, N., Priest, S., Rosenthal, I., Tebo, P. V., Wiegmann, D. A., & Wilson, L. D. (2007). *The report of the BP U.S. refineries independent safety review panel*. Retrieved from <http://s3.documentcloud.org/documents/25773/the-bp-u-s-refineries-independent-safety-review-panel-report.pdf>
- Baker, S., Gertman, D., Hollnagel, E., Holmstrom, C., Marshall, E. C., & Øwre, F. (1985). *An experimental comparison of three computer-based alarm systems: Results and conclusions* (HWR-142). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Baker, S., Hollnagel, E., Marshall, E. C., & Øwre, F. (1985). *An experimental comparison of three computer-based alarm systems: Design, procedure, and execution* (HWR-134). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Baker, S., & Marshall, E. C. (1983). *Principles of a training program for the NORS simulator* (HPR-300). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Baker, S., & Marshall, E. C. (1985). *An operator training program for experiments using the NORS simulator* (HWR-137). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Baker, S., Marshall, E. C., Reiersen, C., Smith, L., & Gaudio, P. J. Jr. (1988). *The experimental evaluation of the success path monitoring system – Results and conclusions* (HWR-224). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Banks, W. W., & Boone, M. P. (1981). *Nuclear control room annunciators: Problems and recommendations* (NUREG/CR-2147). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Banks, W. W., Gertman, D. I., & Petersen, R. J. (1982). *Human-engineering design considerations for cathode-ray-tube-generated displays* (NUREG/CR-2496). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Banks, W. W., Gilmore, W. E., Blackman, H. S., & Gertman, D. I. (1983). *Human engineering design considerations for cathode ray tube-generated displays* (NUREG/CR-3003). Volume 2. Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Beattie, J. D., Rochford, S., & Vicente, K. (1996). Human factors in annunciation systems – Recommendations for a Canadian regulatory framework. *Proceedings of the International Atomic Energy Agency Specialists' Meeting on Experience and Improvements in Advanced Alarm Annunciation Systems in Nuclear Power Plants* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 109-129), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- Bennett, K. B., Payne, M., & Walters, B. (2005). An evaluation of a “time tunnel” display format for the presentation of temporal information. *Human Factors*, 47(2), 342–359. doi: 10.1518/0018720054679434
- Bennett, K. B., Toms, M. L., & Woods, D. D. (1993). Emergent features and graphical elements: Designing more effective configural displays. *Human Factors*, 35(1), 71-97. doi: 10.1177/001872089303500105
- Berg, Ø., Grini, R. E., Johansen, T., & Lilja, M. (1990). *Early fault detection demonstrated on the NORS feedwater system* (HWR-204). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Berg, Ø., Kaarstad, M., Farbrot, J. E., Nihlwing, C., Karlsson, T., & Torralba, B. (2011). Alarm systems. In A. B. Skjerve & A. Bye (Eds.), *Simulator-based human factors studies across 25*

- years. *The history of the Halden Man-Machine Laboratory* (pp. 155-167). London, UK: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-0-85729-003-8_10
- Besnard, D., & Greathead, D. (2003). A cognitive approach to safe violations. *Cognition, Technology and Work*, 5, 272–282. doi: 10.1007/s10111-003-0131-1
- Best, C. F., Ferguson, C. A., Martin, R., Mason, S., Simpson, G. C., & Talbot, C. F. (1985). *The human aspects of computer based monitoring and control of mining operations. Final report on CEC Contract 7206/00/8/01* (Research Report TM/85/06). Edinburgh, UK: IOM (Institute of Occupational Medicine). Retrieved from http://www.iom-world.org/pubs/iom_tm8506.pdf
- Bevan, N. (2001). International standards for HCI and usability. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4), 533-552. doi: 10.1006/ijhc.2001.0483
- Blackman, H. S., Gertman, D. I., & Gilmore, W. E. (1983). *CRT display evaluation: The checklist evaluation of CRT-generated displays* (NUREG/CR-3557). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Bliss, J. P. (1999). Investigations of alarm mistrust under conditions of varying alarm and ongoing task criticality. In N. A. Stanton & J. Edworthy (Eds.), *Human factors in auditory warnings* (pp. 113-127). Aldershot, England: Ashgate.
- Bliss, J. P., & Chancey, E. T. (2014). An investigation of training strategies to improve alarm reactions. *Applied Ergonomics*, 45(5), 1278-1284. doi: 10.1016/j.apergo.2013.06.007
- Bliss, J. P., & Dunn, M. C. (2000). Behavioural implication of alarm mistrust as a function of task workload. *Ergonomics*, 43(9), 1283-1300. doi: 10.1080/001401300421743
- Bliss, J. P., Dunn, M., & Fuller, B. S. (1995). Reversal of the cry-wolf effect: An investigation of two methods to increase alarm response rates. *Perceptual and Motor Skills*, 80, 1231-1242. doi: 10.2466/pms.1995.80.3c.1231
- Bliss, J. P., Gilson, R. D., & Deaton, J. E. (1995). Human probability matching behaviour in response to alarms of varying reliability. *Ergonomics*, 38(11), 2300-2312. doi: 10.1080/00140139508925269
- Bloom, C. P., Bullemer, P., & Reising, D. V. (2013). A methodology for assessing pipeline operator workload and job complexity. *Proceedings of ENTELEC Spring Conference and Expo*, April 9-11, 2013, Houston, TX, USA. Retrieved from <http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/ENTELECCOMMUNITY/8f2d2458-2365-4566-b38f-ec5a21aa4d4b/UploadedImages/A%20Methodology%20for%20Assessing%20Pipeline%20Operator%20workload%20-%20Charles%20Bloom.pdf>
- Boletín Oficial del Estado. (1997). Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. BOE nº 97 (23 de abril de 1997), 12928-12931. Retrieved from BOE website: <https://www.boe.es/boe/dias/1997/04/23/pdfs/A12928-12931.pdf>
- Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 43(3), 213-217, September 27 - October 1, 1999, Houston, TX, USA. doi: 10.1177/154193129904300318
- Bolstad, C. A., & Endsley, M. R. (2000). The effect of task load and shared displays on team situation awareness. *Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*

- (HFES). *Ergonomics for the New Millennium*, 44(1), 189-192, July 30 - August 4, 2000, San Diego, CA, USA. doi: 10.1177/154193120004400150
- Boring, R. L. (2011). The use of simulators in human factors studies within the nuclear industry. In A. B. Skjerve & A. Bye (Eds.), *Simulator-based human factors studies across 25 years. The history of the Halden Man-Machine Laboratory* (pp. 3-12). London: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-0-85729-003-8_1
- Boring, R. L., & Persensky, J. J. (2012). Hybrid alarm systems: Combining spatial alarms and alarm lists for optimized control room operation. *Proceedings of Eighth International Topical Meeting on Nuclear Power Instrumentation and Control and Human Interface Technology (NPIC&HMIT)*, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA.
- Bovell, C. R., Carter, R. J., & Beck, M. G. (1997). *Nuclear power plant control room operator control and monitoring tasks* (ORNL/TM-11726). Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/663388>
- Bransby, M. L. (1998a). Explosive lessons. *Computing & Control Engineering Journal*, 9(2), 57-60. doi: 10.1049/cce:19980202
- Bransby, M. L. (1998b). Matching alarm systems to people. *Proceedings of UKACC International Conference on Control 1998* (pp. 572-577), September 1-4, 1998, Swansea, Wales, UK. doi: 10.1049/cp:19980292
- Bransby, M. L. (2000). Best practice in alarm management. *Proceedings of IEE Seminar on Control of Railways. The Human Challenge* (pp. 8/1-8/4), London. doi: 10.1049/ic:20000258
- Bransby, M. L. (2001). Design of alarm systems. In J. Noyes & M. Bransby (Eds.), *People in control. Human factors in control room design* (pp. 207-222). London: The Institution of Electrical Engineers. doi: 10.1049/PBCE060E_ch13
- Bransby, M. L., & Jenkinson, J. (1997). Alarm management in the chemical and power industries – A survey for the HSE. *Proceedings of IEE Colloquium on Stemming the Alarm Flood* (Digest No. 1997/136) (pp. 1/1-1/8), June 17, 1997, London. doi: 10.1049/ic:19970739
- Bransby, M. L., & Jenkinson, J. (1998a). *The management of alarm systems. A review of current practice in the procurement, design and management of alarm systems in the chemical and power industries* (Contract research report (CRR) 166/1998). HSE Books. Retrieved from HSE website: http://mail.hsebooks.com/research/crr_pdf/1998/crr98166.pdf
- Bransby, M. L., & Jenkinson, J. (1998b). Alarm management in the chemical and power industries: Results of a survey for the HSE. *Proceedings of IEE Colloquium on Best Practices in Alarm Management* (Digest No. 1998/279) (pp. 5/1-5/10), March 25, 1998. Retrieved from <http://0-ieeeexplore.ieee.org/cisne.sim.ucm.es/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=670698&isnumber=14697>
- Bransby, M. L., & Jenkinson, J. (1998c). Alarming performance. *Computer Control and Engineering Journal*, 9(2), 61-67. doi: 10.1049/cce:19980203
- Braseth, A. O., Nihlwing, C., Svengren, H., Veland, Ø., Hurlen, L., & Kvalem, J. (2009). Lessons learned from Halden Project research on human system interfaces. *Nuclear Engineering and Technology*, 41(3), 215-224. doi: 10.5516/NET.2009.41.3.215

- Braun, C., Grimes, J., & Shaver, E. (2011). *A human factors perspective on alarm system research and development 2000 to 2010* (INL/EXT-11-21498). Idaho National Laboratory. Retrieved from INL website: <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/5223033.pdf>
- Bray, M. A. (1989). Alarm filtering and presentation. *Nuclear Engineering and Design*, 113(2), 211-218. doi: 10.1016/0029-5493(89)90072-1
- Brazier, A. (2010). *Operations: A control room is only a component in a complex system*. AB Risk Limited. Retrieved from http://www.abrisk.co.uk/papers/control_room.pdf
- Brown, C. M. (1998). *Human-computer interface design guidelines*. Norwood, New Jersey: Ablex Publishing Corp.
- Brown, W. S., O'Hara, J. M., & Higgins, J. C. (2000). *Advanced alarm systems: Revision of guidance and its technical basis* (NUREG/CR-6684). Washington, DC.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003770903.pdf>
- Buddaraju, D. (2011). *Performance of control room operators in alarm management* (Master thesis of Science in Engineering Science, Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College). Retrieved from http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-04212011-124638/unrestricted/Buddaraju_Thesis.pdf
- Buddaraju, D., Harvey, C. M., & Knapp, G. M. (2011). Performance of control room operators in alarm management. In T. Doolen & E. Van Aken (Eds.), *Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference (IERC)*, May 21-25, 2011, Reno, NV, USA.
- Bullemer, P. T., Tolsma, M., Reising, D. V. C., & Laberge, J. C. (2011). Towards improving operator alarm flood responses: Alternative alarm presentation techniques. *ISA Automation Week*, October 17-20, 2011, Mobile, AL, USA. Retrieved from ASM Consortium website: http://www.asmconsortium.net/Documents/Towards%20Improving%20Alarm%20Flood%20Response%20BullemerTolsmaReisingLaberge_2011ISA_final.pdf
- Burnell, E., & Dicken, C. R. (1997). Handling of repeating alarms. *Proceedings of IEE Colloquium on Stemming the Alarm Flood* (Digest No. 1997/136) (pp. 12/1-12/4), June 17, 1997, London, doi: 10.1049/ic:19970751
- Busby, J. S., & Hibberd, R. E. (2002). Mutual misconceptions between designers and operators of hazardous systems. *Research in Engineering Design*, 13(3), 132-138. doi: 10.1007/s00163-002-0012-2
- Bustamante, E. A., Bliss, J. P., & Anderson, B. L. (2007). Effects of varying the threshold of alarm systems and workload on human performance. *Ergonomics*, 50(7), 1127-1147. doi: 10.1080/00140130701237345
- Bye, A., Berg, Ø., & Øwre, F. (1994). Operator support systems for status identification and alarm processing at the OECD Halden Reactor Project – Experiences and perspective for future development. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 147-164). London: Taylor and Francis.
- Bye, A., Farbroth, J. E., Lee, D.-Y., & Louapre, G. (1998). *COAST – Status and new features of the alarm system toolbox* (HWR-512). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.

- Bye, A., Farbroth, J. E., Nystad, B. H., & Jakobsen, R. (1999). *Problem areas with alarms systems in the process industry – Solutions utilising the COAST alarm system toolbox* (HWR-580). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Bye, A., Handelsby, F., Storberget, T. W., & Nilsen, S. (1994). *COAST – Alarm system toolbox for the process industry* (HWR-389). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Bye, A., Hol, J. Ø., Kårstad, T., Meyer, P., & Nilsen, S. (1992). *The Halden Reactor Project workshop meeting on computerised alarm systems* (HWR-334). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Bye, A., Kårstad, T., Nilsen, S., Barmsnes, K. A., Førdestrømmen, N. T., Valseth, A., Pehrson, M., & Follesø, K. (1992). *An integrated alarm system – A concept study* (HWR-308). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Bye, A., & Moum, B. R. (1996). Alarm handling systems and techniques developed to match operator tasks. *Proceedings of International Atomic Energy Agency Specialist Meeting on experience and improvements in advanced alarm annunciation systems in NPP* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 254-267), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- Bye, A., & Sørenssen, A. (1991). *Principles of early fault detection and signal validation* (HWR-279). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Campbell Brown, D. C. (2002). Horses for courses - A vision for alarm management. *Proceedings of the 3rd Seminars and Workshops on Alarm Systems* (IS 1172). London, UK: IBC Global Conferences.
- Campbell Brown, D. C. (1998). Alarm management experience in BP OIL. *IEE Colloquium on Best Practices in Alarm Management* (Digest No. 1998/279) (pp. 1/1-1/10), March 25, 1998. Retrieved from <http://0-ieeeexplore.ieee.org/cisne.sim.ucm.es/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=670690&isnumber=14697>
- Campbell Brown, D. C. (2003). Alarm system performance – One size fits all? *Measurement and Control*, 36(4), 120-123. doi: 10.1177/002029400303600404
- Campbell Brown, D. C., & O'Donnell, M. (1997). Too much of a good thing? - Alarm management experience in BP oil. Part 1: Generic problems with DCS alarm systems. *IEE Colloquium on Stemming the Alarm Flood* (Digest No: 1997/136) (pp. 5/1-5/6), June 17, 1997, London. doi: 10.1049/ic:19970743
- Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1986). The model human processor. An engineering model of human performance. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance. Volume 2: Cognitive processes and performance* (pp. 45-1 – 45-35). New York: John Wiley and Sons.
- Carrera, J. P., Easter, J. R., & Roth, E. M. (1996). Simulator testing of the Westinghouse AWARE alarm management system. *Proceedings of International Atomic Energy Agency (IAEA) Specialists Meeting on Experience and Improvements in Advanced Alarm Annunciation Systems in Nuclear Power Plants* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 212-216), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- Carvalho, P. V. R. (2006). Ergonomic field studies in a nuclear power plant control room. *Progress in Nuclear Energy*, 48, 51-69. doi:10.1016/j.pnucene.2005.04.001

- Carvalho, P. V. R., dos santos, I. J. A. L., & Vidal, M. C. R. (2005). Nuclear power plant shift supervisor's decision making during microincidents. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 619-644. doi:10.1016/j.ergon.2005.01.010
- Carvalho, P. V. R., dos santos, I. J. A. L., & Vidal, M. C. R. (2006). Safety implications of cultural and cognitive issues in nuclear power plant operation. *Applied Ergonomics*, 37(2), 211-223. doi: 10.1016/j.apergo.2005.03.004
- Carvalho, P. V. R., dos santos, I. J. A. L., Gomes, J. O., & Borges, M. R. S. (2008). Micro incident analysis framework to assess safety and resilience in the operation of safe critical systems: A case study in a nuclear power plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21, 277-286. doi:10.1016/j.jlp.2007.04.005
- Carvalho, P. V. R., dos Santos, I. J. A. L., Gomes, J. O., Borges, M. R. S., & Guerlain, S. (2008). Human factors approach for evaluation and redesign of human-system interfaces of a nuclear power plant simulator. *Displays*, 29, 273-284. doi:10.1016/j.displa.2007.08.010
- Carvalho, P. V. R., Gomes, J. O., & Borges, M. R. S. (2011). Human centered design for nuclear power plant control room modernization. In E. Carrea, A. Greco, & C. Penco (Eds.), *CEUR Workshop Proceedings of 4th Workshop Human Centered Processes (HCP 2011)* (pp. 25-33), February 10-11, 2011, Genoa, Italy. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-696/>
- Carvalho, P. V. R., dos Santos, I. J. A. L., & Vidal, M. C. R. (2008). Human system interface design and operators cognitive strategies. *The Ergonomics Open Journal*, 1, 39-45. doi: 10.2174/1875934300801010039
- Carvalho, P. V. R., Vidal, M. C. R., & de Carvalho, E. F. (2007). Nuclear power plant communications in normative and actual practice: A field study of control room operators' communications. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17(1), 43-78. doi: 10.1002/hfm.20062
- Chaikin, G. (1984). The department of defense human factors standardization program. *Applied Ergonomics*, 15(3), 197-201. doi: 10.1016/0003-6870(84)90061-9
- Chang, S. H., Choi, S. S., Park, J. K., Heo, G., & Kim, H. G. (1999). Development of an advanced human-machine interface for next generation nuclear power plants. *Reliability Engineering and System Safety*, 64, 109-126. doi: 10.1016/S0951-8320(98)00073-8
- Chen, W. L. (1980). Simulation for training and decision-making in large-scale control systems. Part 6: Power plant simulators. *Simulation*, 35(4), 133-136. doi: 10.1177/003754978003500404
- Chériaux, F., Salaün, P., & Naser, J. (2010). Some advanced alarm functions. *Proceedings of the Seventh International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)* (pp. 1842-1851), November 7-11, 2010, Las Vegas, NV, USA.
- Chériaux, F., Salaün, P., & Naser, J. (2011). User's needs for advanced alarm functions. *Proceedings of 54th Annual ISA Power Industry Division Symposium (POWID)*, June 5-10, 2011, Charlotte, NC. Retrieved from <http://www.automationfederation.org/filestore/microsites/121212POWIDFall2012Newsletterwominutes.pdf>

- Choi, S. S., Park, J. K., Hong, J. H., Kim, H. G., Chang, S. H., & Kang, K. S. (1996). Development strategies of an intelligent human-machine interface for next generation nuclear power plants. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 43(3), 2096-2114. doi: 10.1109/23.502304
- Chuang, C.-F., & Chou, H.-P. (2005). Investigation of potential operation issues of human-system interface in Lungmen nuclear power project. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52(4), 1004-1008. doi: 10.1109/TNS.2005.852655
- Chuang, C.-F., & Chou, H.-P. (2008). Design, development and implementation of the human-system interface for Lungmen nuclear project. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(5), 2654-2661. doi: 10.1109/TNS.2008.2003977
- Chuang, C.-F., Chou, H.-P., Chen, Y. B., & Shiao, H. (2008). Regulatory overview of digital I&C system in Taiwan Lungmen project. *Annals of Nuclear Energy*, 35, 877-889. doi: 10.1016/j.anucene.2007.09.010
- Clymer, A. B. (1980). Simulation for training and decision-making in large-scale control systems. Part 1: Types of training simulators. *Simulation*, 35(2), 39-41. doi:10.1177/003754978003500203
- Cochran, E. L. (1997). Managing abnormal situations in the process industries I: Automation, people, culture. *NIST Proceedings of the Motor Vehicle Manufacturing Technology (MVMT) Workshop*, October 27, 1997, Ann Arbor, MI, USA. Retrieved from ASM Consortium website: <https://www.asmconsortium.net/Documents/Managing%20ASM.pdf>
- Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil. (2011). *Accident involving a McDonnell Douglas DC-9-82 (MD-82) aircraft, registration EC-HFP, operated by Spanair, at Madrid-Barajas airport, on 20 August 2008* (Report A-032/2008). Ministerio de Fomento, Gobierno de España. Retrieved from Ministerio de Fomento website: http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/EC47A855-B098-409E-B4C8-9A6DD0D0969F/107087/2008_032_A_ENG.pdf
- Connelly, C. S. (1997). Lack of planning in alarm system configuration is, in essence, planning to fail. *ISA Transactions*, 36(3), 219-225. doi: 10.1016/S0019-0578(97)00020-7
- Consejo de Seguridad Nuclear. (1986). *Guía de seguridad nº 1.1 Cualificaciones de licencias de personal para la obtención y uso de operación de centrales nucleares*. Madrid: CSN. Retrieved from CSN website: http://www.csn.es/publicaciones/N1_1.pdf
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2002). *Guía de seguridad 1.11 Modificaciones de diseño en centrales nucleares*. Madrid: CSN. Retrieved from CSN website: http://www.csn.es/descarga/N1_11.pdf
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2007). *Instrucción de 21 de febrero de 2007, del Consejo de Seguridad Nuclear, número IS-11, sobre licencias de personal de operación de centrales nucleares*. Madrid: CSN. Retrieved from CSN website: <http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/normativa/instruccion11ok.pdf>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2009). *Instrucción IS-21, sobre requisitos aplicables a las modificaciones en las centrales nucleares*. BOE nº 43 de 19 de febrero de 2009. Retrieved from CSN website: <http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/normativa/is-21.pdf>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2010a). *Instrucción IS-26, de 16 de junio de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre requisitos básicos de seguridad nuclear aplicables a las*

- instalaciones nucleares*. BOE nº 165 de 8 de julio de 2010. Retrieved from CSN website: <http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/normativa/csn-is-26.pdf>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2010b). *Instrucción IS-27, de 16 de junio de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios generales de diseño de centrales nucleares*. BOE nº 165 de 8 de julio de 2010. Retrieved from CSN website: <http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/normativa/csn-is-27.pdf>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (n.d.). *Normativa CSN*. Retrieved from CSN website: <http://www.csn.es/index.php/es/normativa/normativa-csn>
- Cook, B. (2012). *Alarm management primer* (WP-12-ENG) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/20120402-alarm-management-primer.pdf>
- Cook, R. I., Woods, D. D., & McDonald, J. S. (1991). *Human performance in anesthesia: A corpus of cases* (Technical Report 91-TR-03). Columbus, OH: Cognitive Systems Engineering Laboratory, Department of Industrial and Systems Engineering, Ohio State University. Retrieved from <http://www.ctlab.org/documents/Human%20Performance%20in%20Anesthesia.pdf>
- Crowe, R. (2002). Ask experts: Abnormal situation management. *Chemical Engineering Progress (CEP) Magazine*, 98(4), 77.
- Danchak, M. M. (1980). The content of process control alarm displays. *Proceedings of Instrument Society of America (ISA)* (pp. 101-109), October 20-23, 1980, Houston, TX, USA.
- Danchak, M. M. (1982). *Alarms within advanced displays systems: Alternatives and performance measures* (NUREG/CR-2776). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Davey, E. (2000). Process monitoring during normal operations at Canadian nuclear power plants. *Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES). Ergonomics for the New Millennium*, 44(3), 811-814, July 30 - August 04, 2000, San Diego, CA, USA. doi: 10.1177/154193120004402282
- Davey, E. C., & Feher, M. P. (1997). Development of improvements to CANDU computerized annunciation. In D. I. Gertman, D. L. Schurman, & H. S. Blackman (Eds.), *Proceedings of IEEE Sixth Conference on Human Factors and Power Plants*, June 8-13, 1997, Orlando, FL, USA. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/IEEE97_CAMLS_Annunciation.pdf
- Davey, E. C., Feher, M. P., & Guo, K. Q. (1995). An improved annunciation strategy for CANDU plants. *Proceedings of American Nuclear Society Conference Computer-based Human Support Systems: Technology Methods and Future*, June 25-29, 1995, PA, USA. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/ANS95_Ann_Strategy.pdf
- Davey, E. C., Guo, K. Q., Russomanno, S. A., Popovic, J. R., & Archer, P. (1992). Towards defining the functional role for CANDU annunciation. *Proceedings of the IEEE 5th Conference on Human Factors and Power Plants* (pp. 314-319), June 7-11, 1992, Monterey, CA, USA. doi: 10.1109/HFPP.1992.283390

- Davey, E. C., & Lane, L. (2001). Updated requirements for control room annunciation: An operations perspective. *Proceedings of Canadian Nuclear Society Conference*, June 10-13, 2001, ON, Canada. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/CNS01_Updated_Requirements.pdf
- Davey, E. C., Sheehy, E. J., & Fiegel, T. T. (1993). Characterizing annunciation use in a CANDU nuclear power plant through task analysis. *Proceedings of American Nuclear Society*, November 15-19, San Francisco, CA, USA. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/ANS93_Character_Ann_Use.pdf
- De Keyser, V., & Nyssen, A.-S. (2001). Activity and instruments. In V. De Keyser & A. B. Leonova (Eds.), *Error prevention and well being at work in Western Europe and Russia: Psychological tradition and new trends* (pp. 25-49). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. doi: 10.1007/978-94-010-0784-9_2
- De la Fuente Arias, M. E. (2004). Manual de tecnología nuclear para periodistas. Madrid: Foro de la Industria Nuclear Española. Retrieved from http://www.nuclenor.org/public/otros/manual_tecnologia_periodistas.pdf
- De la Garza, C., & Labarthe, J.-P. (2010). Contribution to the human factors evaluation program of the EPR operating means. Some elements for discussion. In Braarud, P. Ø., Nystad, E., Strand, S., Skråning, G., Bye, A., Hildebrandt, M., & Massaiu, S. (2010). *The Halden Reactor Project meeting on Integrated System Validation (ISV) – Status of current approaches to ISV and R&D needs* (HWR-939) (pp. 88-93). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- De Vries, J. W. (2000). Acceptance of new technology and layout in control rooms. In P. F. Elzer, R. H. Kluwe, & B. Boussoffara (Eds.), *Human error and system design and management*, 253, 173-175. Berlin: Springer. doi: 10.1007/BFb0110470
- Department of Defense. (1996). *Technical architecture framework for information management, volume 8: DoD Human computer interface style guide*. Washington, D.C.: Defense Information Systems Agency. Retrieved from http://www.everyspec.com/DoD/DOD-General/download.php?spec=DISA_TAFIM_VOL8.007545.pdf
- Department of Defense. (1998). *Human engineering design guidelines* (MIL-HDBK-759C). Philadelphia: Defense Automation and Production Service. Retrieved from http://www.everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0700-0799/MIL-HDBK-759C_22550/
- Department of Defense. (1999). *Human engineering program process and procedures* (MIL-HDBK-46855A). Philadelphia: Defense Automation and Production Service. Retrieved from http://www.everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-9000-and-Up/MIL-HDBK-46855A_24734/
- Department of Defense. (2002). *Index of non-government standards on human engineering design criteria and program requirements guidelines*. Retrieved from <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA436635>
- Department of Defense. (2004). *Index of government standards on human engineering design criteria, processes, and procedures*. Retrieved from <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA436638>

- Department of Defense. (2012). *Human engineering* (MIL-STD 1472G). Philadelphia: Defense Automation and Production Service. Retrieved from [http://www.public.navy.mil/comnavsafecen/Documents/acquisition/MIL-STD-1472G\[1\].pdf](http://www.public.navy.mil/comnavsafecen/Documents/acquisition/MIL-STD-1472G[1].pdf)
- Department of Transport. (1988). *The merchant shipping Act 1894. MV Herald of Free Enterprise. Report of Court No. 8074. Formal Investigation*. London: Her Majesty's Stationery Office. Retrieved from <http://www.epcollege.com/EPC/files/4b/4b028804-f5c2-4fb0-a49d-f42078002bcf.pdf>
- Desborough, L. (2011). Taming the alarm problem: To boldly go where others have gone before. Retrieved from <http://www.aami.org/htsi/alarms/pdfs/Taming%20the%20Alarm%20Problem%20R3.pdf>
- Det Norske Veritas. (2011). *Major hazard incidents arctic offshore drilling review. National Energy Board* (Report No.: NEB 2010-04/DNV Reg. No.: ANECA 851). Retrieved from http://www.dnvusa.com/Binaries/NEB%20Report%20April%208_tcm153-455725.pdf
- DeVries, S. (2010). *Why is alarm management required in modern plants?* [White paper]. Plano, TX: Invensys. Retrieved from Invensys website: http://iom.invensys.com/EN/pdfLibrary/WhitePaper_Invensys_WhyAlarmManagementIsRequiredInModernPlants_10-10.pdf
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas. (1990). *Directiva del Consejo de 29 de mayo de 1990, referente a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización (quinta directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE)*. Retrieved from BOE website: <http://www.boe.es/doue/1990/156/L00014-00018.pdf>
- Dicken, C. R. (1998). Advanced control desks for effective display of alarms. *Proceedings of IEE Colloquium on Best Practices in Alarm Management* (Digest No. 1998/279) (pp. 3/1-3/5), March 25, 1998. Retrieved from <http://0-ieeeexplore.ieee.org/cisne.sim.ucm.es/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=670696&isnumber=14697>
- Dicken, C. R. (1999a). Soft control desks and alarm display. *Computing & Control Engineering Journal*, 10(1), 11-16. doi: 10.1049/cce:19990104
- Dicken, C. R. (1999b). Soft control desks – Producing an effective alarm system. *People in Control: An International Conference on Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres* (Conference Publication No. 463) (pp. 212-216), June 21-23, 1999. doi: 10.1049/cp:19990189
- Dickety, N. (2011). Managing the human contribution to risk at major hazard installations. *Symposium on Electrical and Mechanical Safety & Energy Efficiency. Engineering a Safe and Low-Carbon Environment*, January 24-25, 2011, Hong Kong. Retrieved from http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/about/symposium/2011/session/fullpaper/K3_Full%20Paper_Nick%20Dickety.pdf
- Ditlefsen, T., Kristiansen, L. I., Meyer, B. D., & Haukenes, H. (1997). *Automatics display system ALDIV: Design & implementation* (HWR-560). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.

- Douglas, L., Aleva, D., & Havig, P. (2007). Shared displays: An overview of perceptual and cognitive issues. *Proceedings of 12th International Command and Control Research and Technology Symposium. Adapting C2 to the 21st Century*, June 19-21, 2007, Newport, Rhode Island, NJ, USA. Retrieved from http://www.dodccrp.org/events/12th_ICCRTS/CD/html/papers/116.pdf
- Drøivoldsmo, A. (2003). *New tools and technology for the study of human performance in simulator experiments* (Doctoral dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim). Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:123651/FULLTEXT01.pdf>
- Drøivoldsmo, A., Skraaning, G., Sverrbo, M., Dalen, J., Grimstad, T., & Andresen, G. (1998). *Continuous measures of situation awareness and workload* (HWR-539). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Dubois, L. (2015). The expected impact of the IEC 62682 Standard on alarm management for the process industries. *ARC Industry Forum Europe 2015*, March 4-5, 2015, Amsterdam, The Netherlands. Retrieved from <http://www.arcweb.com/events/arc-industry-forum-europe/europe2015presentations/The%20Expected%20Impact%20of%20the%20IEC%2062682%20Standard%20on%20Alarm%20Management%20for%20the%20Process%20Industries.pdf>
- Dudfield, H. J., Macklin, C. M., & Fearnley, R. P. (2000). Visualising the Battlefield with panoramic displays. RTO Human Factors and Medicine panel (HFM). *Proceedings of Symposium on Usability of Information in Battle Management Operations* (RTO-MP-57 AC/323(HFM)TP/29), NATO Research and Technology Organisation, April 10-13, 2000, Oslo, Norway. Retrieved from <http://ftp.rta.nato.int/public/PubFulltext/RTO/MP/RTO-MP-057/MP-057-13.PDF>
- Dul, J., Vries, H. de, Verschoof, S., Eveleens, W., & Feilzer, A. (2004). Combining economic and social goals in the design and production systems by using ergonomics standards. *Computers and Industrial Engineering*, 47, 207-222. doi: 10.1016/j.cie.2004.07.005
- Dunn, D. G., & Sands, N. P. (2005). ISA-SP18 – Alarm systems management and design. *ISA EXPO 2005 Automation & Control Conference*, October 25-27, 2005. Chicago, IL, USA. Retrieved from https://www.google.es/url?url=https://www.isa.org/link/SP18/&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ei=EJTOU5_bFKuR0QWP54HwCQ&ved=0CBQQFjAA&usg=AFQjCNEwC3wHmpWotIsSzN4-GXwmkVUKLw
- Dzwig, T. (2008). *The role of alarm annunciators in managing plant safety* [White paper]. Retrieved from Omniflex website: <http://www.instrumentation.co.za/papers/C17735.pdf>
- Easter, J. R. (1991). Role of the operator and control room design. In J. White & D. Lanning (Eds.), *WTEC Panel on European Nuclear Instrumentation and Controls* (Report No. PB92-100197). Washington, D.C.: National Technical Information Service. Retrieved from <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950003353.pdf>
- Easter, J. R., & Lot, L. (1992). Back-fitting a fully computerized alarm system into an operating Westinghouse PWR: A progress report. *Proceedings of IEEE 5th Conference on Human Factors and Power Plants* (pp. 338-341), June 7-11, 1992, Monterey, CA, USA. doi: 10.1109/HFPP.1992.283387

- Edworthy, J., & Adams, A. (1996). *Warning design: A research prospective* (pp. 101-128). London: Taylor & Francis.
- Edworthy, J., & Hellier, E. (2005). Fewer but better auditory alarms will improve patient safety. *Quality Safety Health Care*, 14, 212-215. doi:10.1136/qshc.2004.013052
- Edworthy, J., & Hellier, E. (2006). Alarms and human behaviour: Implications for medical alarms. *British Journal of Anaesthesia*, 97(1), 12–17. doi:10.1093/bja/ael114
- Endesa (n.d.). Sala de control, Central Nuclear de Vandellós, Tarragona. Retrieved from Endesa website:
<http://www.endesa.com/es/saladeprensa/multimedia/imagenes/imagenesalbum?album=f2e744d0-0a0a-4665-af07-8b47da97a762>
- Engineering Equipment and Materials Users Association. (1999). *Alarm systems. A guide to design, management and procurement* (EEMUA Publication 191) (1st ed., 1999; 2nd ed., 2007; 3rd ed., 2013). London, UK: EEMUA.
- Engineering Equipment and Materials Users Association. (2002). *Process plant control desks utilising human-computer interfaces – A guide to design, operational and human interface issues* (EEMUA Publication 201) (1st ed., 2002; 2nd ed., 2010). London, UK: EEMUA.
- Emigholz, K. F. (1996). Improving the operator's capabilities during abnormal operations; observations from the control house. *Process Safety Progress*, 15(3), 154-158. doi: 10.1002/prs.680150308
- EPRI (1992a). *Alarm processing and diagnostic system* (EPRI TR-100838). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website:
<http://www.epri.com/search/Pages/results.aspx?k=EPRI%20TR-100838>
- EPRI (1992b). *Control room alarm system upgrades* (EPRI TR-100584). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website:
<http://www.epri.com/search/Pages/results.aspx?k=EPRI%20TR-100584>
- EPRI (1993). *Human factors guidelines for fossil power plant control rooms and remote-control stations* (EPRI TR-101814). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=TR-101814>
- EPRI (2000). *Human factors guidance for digital I&C systems and hybrid control rooms: Scoping and planning study* (EPRI 1001066). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website:
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001001066&Mode=download>
- EPRI (2002). *Nuclear power plant control room modernization planning* (EPRI 1003569). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website:
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001003569&Mode=download>
- EPRI (2003a). *Alarm processing methods. Improving alarm management in nuclear power plant control rooms* (EPRI 1003662). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website:

- <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001003662&Mode=download>
- EPRI (2003b). *Critical human factors technology needs for digital instrumentation and control and control room modernization* (EPRI 1007794). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001007794&Mode=download>
- EPRI (2003c). *Information display: Considerations for designing modern computer-based display systems* (EPRI 1002830). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001002830&Mode=download>
- EPRI (2003d). *Interim human factors guidance for hybrid control rooms and digital I&C systems* (EPRI 1003696). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- EPRI (2003e). *Technical material for a workshop on control room upgrades* (EPRI 1007795). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001007795&Mode=download>
- EPRI (2004a). *Human factors guidance for control room and digital human-system interface design and modification guidelines for planning, specification, design, licensing, implementation, training, operation, and maintenance* (EPRI 1008122). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001008122&Mode=download>
- EPRI (2004b). *Practical maintenance of digital systems. Guidance to maximize the benefits of digital technology for the maintenance of digital systems and plant equipment* (EPRI 1008124). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001008124&Mode=download>
- EPRI (2005). *Advanced control room alarm system: Requirements and implementation guidance*. (EPRI 1010076). Palo Alto, CA: Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001010076&Mode=download>
- EPRI (2006). *Alarm management requirements based on Electricite de France experience. Volume 1 – Essential features of Edf nuclear power plant alarm system. Volume 2 – Edf alarm management requirements* (EPRI 1013483). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001013483&Mode=download>
- EPRI (2008). *Alarm management and annunciator applications guidelines* (EPRI 1014316). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001014316>

- EPRI (2011). *Alarm management implementations: Using EPRI's alarm management guidelines to improve alarm management systems* (EPRI 1023146). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001023146>
- Ergoestudio (2004a). *¿Cómo observamos? Entendiendo el movimiento de nuestros ojos*. Retrieved from Ergoestudio website: http://www.ergoestudio.com/articulos/articulos/como_observamos.php
- Ergoestudio (2004b). *Dificultades de los sistemas de trazabilidad visual o eye tracking en la evaluación de sitios web*. Retrieved from Ergoestudio website: http://www.ergoestudio.com/articulos/articulos/dificultades_analisis_eyetracking.php
- Errington, J., DeMaere, T., & Reising, D. V. (2004). After the alarm rationalization – Managing the DCS alarm system. *Proceedings of the 16th Annual Ethylene Producers' Conference, 2004 Spring National Meeting*, April 25-29, 2004, New Orleans, LA, USA. Retrieved from http://www.applyhcs.com/wp-content/themes/hcs/media/pdf/AfterTheAlarmRationalization_EPC04.pdf
- Errington, J., Reising, D., & Burns, C. (2009). *ASM Consortium guidelines: Effective alarm management practices*. Phoenix, AZ: ASM Consortium.
- Exida (2009). *Alarm management* [Brochure]. Retrieved from exida website: http://www.exida.com/images/uploads/alarm_management_rev2.pdf
- Exida (2010). *Alarm documentation & rationalization with SILAlarm™* [Brochure]. Retrieved from http://www.batchcontrol.hu/letoltesek/Egyeb/SILAlarm_brochure.pdf
- Fahlbruch, B., Dubiel, J., Neumann, L., & Kaupach, O. (2007). *Proceedings of the OECD-CCA workshop on human factors in chemical accidents and incidents. Discussion document*, May 8-9, 2007, Postdam, Germany. Retrieved from http://www.umweltbundesamt.de/nachhaltige-produktion-anlagensicherheit/anlagen/OECD_Workshop_Proceedings_070605.pdf
- Fält, C. O., Follesø, K., Hol, J. Ø., Kvalem, J., Sivertsen, T., & Sørenssen, A. (1995). *The Halden Reactor Project workshop meeting on long-term development of the Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB)* (HWR-428). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Farbro, J. E., Bye, A., & Berg, Ø. (2000). How to design alarm systems that also work during plant upset conditions. *Proceedings of the Second Annual Two Day Seminar and Workshops on Alarm Systems* (IS 1152), June 28-29, 2000, London, UK. London, UK: IBC Global Conferences Limited.
- Federal Aviation Administration. (1996). *Human factors design guide* (DOT/FAA/CT-96/1). Springfield, VA: National Technical Information Service. Retrieved from <https://www.hf.faa.gov/docs/hfdg.pdf>
- Federal Aviation Administration. (2001). *Computer-human interface guidelines: A revision to chapter 8 of the human factors design guide* (DOT/FAA/CT-01/08). Springfield, VA: National Technical Information Service. Retrieved from <https://www.hf.faa.gov/docs/CHIchapter8FINAL.pdf>
- Federal Aviation Administration. (2003). *The human factors design standard* (HF-STD-001). U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, William Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, NY. Retrieved from

- http://www.everyspec.com/search_result.php?cx=partner-pub-0685247861072675%3A94rti-pv850&cof=FORID%3A10&ie=ISO-8859-1&q=The+human+factors+design+standard+&siteurl=www.everyspec.com%2FFAA%2FFAA-A-General%2FODOT_FAA_CT-96_1_20703%2F&ref=&ss=125j15625j2
- Fengpei, H. (2006). The studies of eye tracking and usability test. *Proceedings of 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design (CAIDCD '06)*, November 17-19, 2006, Hangzhou, China. doi: 10.1109/CAIDCD.2006.329343
- Fickelscherer, R. J., & Chester, D. L. (2013). *Optimal automated process fault analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9781118481950
- Fink, R. T. (1984). *Procedure for reviewing and improving power plant alarm systems* (EPRI NP-3448-L) (Rev. ed., 1990). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-3448-LR1&Mode=download>
- Fink, R. T., Zarechnak, A., Williges, R. C., & O'Brien, J. F. (1992). Appropriate choice of alarm system technologies: EPRI research. *Proceedings of IEEE 5th Conference on Human Factors and Power Plants* (pp. 320-331), June 7-11, 1992, Monterey, CA, USA. doi: 10.1109/HFPP.1992.283389
- Fiset, J.-Y. (2009). *Human-machine interface design for process control applications*. Research Triangle Park, NC: Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Fitch, K. R. (2002). Tcl/Tk-based alarm presentation system. *Proceedings of 3rd European Tcl/Tk User Meeting*, June 27-28, 2002, Munich/Perlach, Germany. Retrieved from https://www.tcl.tk/community/tcl2002/archive/Tcl2002papers/fitch-aps/aps_paper.pdf
- Fitzpatrick, B. A. (2006). Section 4.11 DCS: Management of abnormal conditions. In B. Liptak (Ed.), *Instrument engineers' handbook: Process control* (pp. 706-718). Stanford, CT: CRC Press.
- Fleger, S., & O'Hara, J. (2010). Updating the NRC's human factors engineering design review guidance. *Proceedings of the Seventh International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)* (pp. 793-800), November 7-11, 2010, Las Vegas, NV, USA.
- Flexman, R. E., & Stark, E. A. (1987). Training simulators. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors* (pp. 1012-1038). New York: Wiley and Sons.
- Foro Nuclear (n.d.). Sala de control de C. N. de Almaraz. Retrieved from Foro Nuclear website: <http://www.foronuclear.org/en/sala-de-prensa/archivo-fotografico/archivo-fotografico/centrales-nucleares-en-espaa/sala-de-control>
- Foro Nuclear (n.d.). Simulador de la sala de control de C. N. de Cofrentes. Retrieved from Foro Nuclear website: <http://www.foronuclear.org/en/sala-de-prensa/archivo-fotografico/archivo-fotografico/centrales-nucleares-en-espaa/simulador-sala-control-cofrentes-valencia>
- Foslien, W. (2007). ASM approach to incident analysis. Effective automation to improve operator performance. *Proceedings of 2007 International Symposium beyond Regulatory Compliance, Making Safety Second Nature. Symposium conducted at the Meeting of Mary Kay O'Connor Process Safety Center*, October 23-24, 2007, College Station, TX, USA. Retrieved from <http://psc.che.tamu.edu/wp-content/uploads/2007%20Symposium/Track%201%20presentations/1%20Foslien.pdf>

- Førdestrømmen, N. T., & Kvalem, J. (1996). *Halden Man-Machine Laboratory as of 1996* (HWR-476). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Førdestrømmen, N. T., Moum, B. R., & Torralba, B. (1994). *Alarm system CASH: Main design characteristics* (HWR-398). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Førdestrømmen, N. T., & Torralba, B. (1993). Development of a Computerised Alarm System for HAMMLAB (CASH). *XIX Reunión Annual de la Sociedad Nuclear Española* (SNE), October 6-8, 1993, Cáceres, Spain.
- Frey, P. R., Sides, W. H. Jr., Hunt, R. M., & Rouse, W. B. (1984). *Computer-generated display system guidelines* (EPRI NP-3701). Vols. 1&2. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Friedman-Berg, F., & Allendoerfer, K. (2008). Nuisance alerts in operational ATC environments: Classification and frequencies. *Proceedings of 52nd Annual Meeting of the the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 52(1), 104-108, September 22-26, 2008, New York City, NY, USA. doi: 10.1177/154193120805200123
- Frogner, B., & Meijer, C. H. (1978). *On-line power plant alarm and disturbance analysis system, interim report* (EPRI NP-613). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Fujita, Y., Watada, Y., Kodaira, T., Nagai, K., Dan, H., Ichimura, Y., Nishimura, Y., & Yamada, S. (1988). Improved annunciator system for Japanes PWRs: Functions and evaluation. In IAEA (Ed.), *Man-Machine Interface in the Nuclear Industry. Proceedings of an international conference on man-machine interface in the nuclear industry (control and instrumentation, robotics and artificial intelligence)* (pp. 241-248), February 15-19, 1988, Tokyo, Japan. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- Gallagher, J. M. Jr., Leider, J. P., & Crunk, S. (1982). *Disturbance analysis and surveillance system scoping and feasibility study* (EPRI NP-2240). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-2240>
- Geary, L. C., Mastromonico, C. R., & Willoner, T. (2005). Applying current human factors engineering guidance to control room design. *Proceedings of 15th Annual Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference*, June 6-8, 2005, Nashville, TN, USA. Retrieved from <http://sti.srs.gov/fulltext/pcs2005004/pcs2005004.pdf>
- Gérard, N., & Manzey, D. (2009). Overcoming the cry-wolf effect: Operators' checking behaviour in response to different levels of imperfect alarms in a dual-task paradigm. In A. Liechtenstein, C. Stöbel, & C. Clemens (Eds.), *Prospektive gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion. 8. Berliner werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (pp. 430-436). Düsseldorf: VDI. Retrieved from <https://www.tu-berlin.de/fileadmin/f25/dokumente/8BWMMS/21.2-Gerard.pdf>
- Gérard, N., Huber, S., Nachtwei, J., Schubert, U., & Satriadarma, B. (2011). A framework for designers to support prospective design. *eMinds: International Journal on Human-Computer Interaction*, 2(7), 17-38. Retrieved from <https://www.prometei.de/fileadmin/prometei.de/allgemein/AG-OP-230110-Manuscript-Operators.pdf>
- Gil, B. (2012). Factores humanos. Punto de vista del regulador. *Jornada técnica de la Sociedad Nuclear Española "Actuaciones seguras en instalaciones nucleares. La ingeniería de factores humanos"*, September 20, 2012, Tarragona, Spain. Retrieved from SNE website:

- http://www.sne.es/images/stories/recursos/actividades/tecnica/2012/05_Factores_Humanos_Punto_de_Vista_del_Regulador.pdf
- Gilmore, W. E. (1985). *Human engineering guidelines for the evaluation and assessment of video display units* (NUREG/CR-4227). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1031/ML103140329.pdf>
- Gilmore, W. E., Gertman, D. I., & Blackman, H. S. (1989). *The user-computer interface in process control. A human factors engineering handbook*. San Diego, CA: Academic Press.
- Goble, G., & Stauffer, T. (2007). Don't be alarmed. Avoid unplanned downtime from alarm overload, use top techniques to improve alarm management. *InTech*, January. pp. 4. Retrieved from <http://www.industry.usa.siemens.com/automation/us/en/automation-systems/process-control-system/technology-articles/documents/pafl000600207.pdf>
- Goldberg J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24, 631-645. doi: 10.1016/S0169-8141(98)00068-7
- Gómez Camargo, O., & Romero Jiménez, G. (2011). Gestión de alarmas en plantas de proceso. *Boletín IIE*, enero-marzo, 3-11. Retrieved from <http://www.iie.org.mx/boletin012011/divulga.pdf>
- Goodstein, L. P. (1985). *Functional alarming and information retrieval* (Risø-M-2511-18). Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory. Retrieved from DTU National Laboratory website: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:88402/datastreams/file_fc59b9c2-14a1-4c29-a635-4f150d3e1698/content
- Gordon, P., & Andersson, T. (2007). Alarm Presentation System (APS) at Ringhals nuclear power plant unit 2 – Sweden. *Proceedings of the IAEA Technical Meeting on Integrating Analog and Digital I&C Systems in Hybrid Main Control Rooms at NPPs*, October 28 - November 3, 2007 Toronto, ON, Canada. Retrieved from IAEA website: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/39/008/39008903.pdf>
- Grosdidier, P., Connor, P., Hollifield, B., & Kulkarni, S. (2003). A path forward for DCS alarm management. *Hydrocarbon Processing*, November, 2003. pp. 16. Retrieved from http://www.controlglobal.com/Media/MediaManager/wp_015_pas_alarmmgmt.pdf
- Gunnarsson, T. (2007). Modernizing of Oskarshamn NPP with focus on control room issues. *Proceedings of IAEA Technical Meeting on Integrating Analog and Digital Instrumentation and Control Systems in Hybrid Main Control Rooms at Nuclear Power Plants*, October 28 - November 3, 2007, Toronto, ON, Canada. Retrieved from IAEA website: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/39/008/39008903.pdf>
- Gunnarsson, T. (2010). Experiences from integrated system validation in OKG. In Braarud, P. Ø., Nystad, E., Strand, S., Skråning, G., Bye, A., Hildebrandt, M., & Massaiu, S. (2010). *The Halden Reactor Project meeting on Integrated System Validation (ISV) – Status of current approaches to ISV and R&D needs* (HWR-939) (pp. 107-112). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Gunnarsson, T., & Eliasson, M. (2010). The control room upgrade in Oskarshamn 2 modernization project, lesson learned from on going human factor design process. *Proceedings of the Seventh International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human*

- Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT) (pp. 1812-1821), November 7-11, 2010, Las Vegas, NV, USA.
- Gunnarsson, T., & Eliasson, M. (2011). The control room upgrade in Oskarshamn 2 modernization project lesson learned from ongoing human factor design. *Proceedings of the Man-Technology-Organisation of the Enlarged Halden Programme Group Meeting* (EHPG), October 2-7, 2011, Sandefjord, Norway. Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Gunnarsson, T., & Farbroth, J. E. (2005). Integrating the human factor in the modernization of Oskarshamn 1. *Eurosafe Tribune*, 15-17. Retrieved from http://www.eurosafe-forum.org/files/pe_370_7_1_tribune_006.pdf
- Ha, J. S., & Seong, P. H. (2010). Attentional-resource effectiveness measures in monitoring and detection tasks in nuclear power plants. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 40(5), 993-1008. doi: 10.1109/TSMCA.2010.2044999
- Ha, J. S., & Seong, P. H. (2014). Experimental investigation between attentional-resource effectiveness and perception and diagnosis in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 278, 758-772. doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.025
- Haas, E. C., & Edworthy, J. (1996). Designing urgency into auditory warnings using pitch, speed and loudness. *Computing and Control Engineering Journal*, 7(4), 193-198. doi: 10.1049/cce:19960407
- Habibi, B. (2003). A solution for executing alarm management improvement – Project based on industrial best practice. *Proceedings of European Process Safety Centre of the Seminar Best Practice Guide on High Demand Situations*, November 13-14, 2003, Brussels, Belgium. Retrieved from <http://www.epsc.org/data/files/PRISM/Habibi.pdf>
- Habibi, E., & Hollifield, B. (2006). Alarm systems greatly affect offshore facilities amid high oil prices. *World Oil*, September, 101-105. Retrieved from [http://www.pas.com/Downloads-\(1\)/Press-Coverage/HabibiHollifieldWorldOil.aspx](http://www.pas.com/Downloads-(1)/Press-Coverage/HabibiHollifieldWorldOil.aspx)
- Habibi, E., & Hollifield, B. (2008). Seven steps in creating a highly effective alarm management system. *Proceedings of the WBF North American Conference*, March 24-26, 2008, Philadelphia, PA, USA. Retrieved from http://www.isa.org/Content/Microsites165/SP18_Instrument_Signals_and_Alarms/Home163/Working_Group_Resources/WBF2008NA-Habibi-Hollifield-91.pdf
- Hajdukiewicz, J., & Wu, P. (2004). Beyond trends: A framework for mapping time-based requirements and display formats for process operations. *Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 48(16), 1885-1889, September 20-24, 2004, New Orleans, LA, USA. doi: 10.1177/154193120404801620
- Hallbert, B. P., & Meyer, P. (1995). *Summary of lessons learned at the OECD Halden Reactor Project for the design and evaluation of human-machine systems* (HWR-376). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Hallbert, B. P., Sebok, A., & Morisseau, D. (2000). *A study of control room staffing levels for advanced reactors* (NUREG/IA-0137). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003774060.pdf>

- Han, S. H., Yang, H., & Im, D.-G. (2007). Designing a human-computer interface for a process control room: A case study of a steel manufacturing company. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37, 383-393. doi: 10.1016/j.ergon.2006.12.006
- Härefors, E. (2008). *Use of large screen displays in nuclear control room* (UPTEC STS08 024) (Master thesis, Department of Information Technology, Uppsala University). Sweden: Uppsala University. Retrieved from http://www.utn.uu.se/sts/cms/filarea/0804_h%C3%A4refors.pdf
- Harker, S. (1995). The development of ergonomics standards for software. *Applied Ergonomics*, 26(4), 275-279. doi: 10.1016/0003-6870(95)00032-8
- Hartley, P., Yaraskavitch, D., & Davey, E. (1998). Control room annunciation – Problem assessment and selection of improvement priorities. *Proceedings of Canadian Nuclear Society Conference*, October 18-21, 1998, ON, Canada. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/CNS98_PND_B_Ann.pdf
- Hassan Montero, Y., & Herrero Solana, V. (2007). Eye-tracking en interacción persona-ordenador. *No Solo Usabilidad*, 6. Retrieved from <http://www.nosolousabilidad.com/articulos/eye-tracking.htm>
- Hauland, G. (2002). *Measuring team situation awareness in training of en route air traffic control. Process oriented measures for experimental studies* (Risø-R-1343EN). Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory. Retrieved from Risø National Laboratory website: <http://www.risoe.dk/rispubl/sys/syspdf/ris-r-1343.pdf>
- Hauland, G. (2008). Measuring individual and team situation awareness during planning tasks in training of en route air traffic control. *The International Journal of Aviation Psychology*, 18(3), 290-304. doi: 10.1080/10508410802168333
- Hauland, G., & Hallbert, B. (1995). Relations between visual activity and verbalized problem solving: A preliminary study (HP-External No.: 105). *Proceedings of Fifth European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control*, August 30 - September 1, 1995, Hanasaari, Espoo, Finland.
- Hatch, D. (2005). Alarms: Prevention is better than cure. *The Chemical Engineering (Tce)*, July, 40-42. Retrieved from exida website: <http://www.exida.com/images/uploads/769alarmmngt.pdf>
- Hatch, D., & Stauffer, T. (2009). Operators on alert: Operator response, alarm standards, protection layers key to safe plants. *InTech*, September. Retrieved from exida website: [http://www.exida.com/images/uploads/Alarm_Management_Intech_\(Sept_2009\).pdf](http://www.exida.com/images/uploads/Alarm_Management_Intech_(Sept_2009).pdf)
- Health and Safety Executive. (1994). *Havkong incident: A joint report of the Havkong incident at Braefoot Bay Terminal by Aberdour Fife on 23 January 1993*. Marine Accident Investigation Branch (MAIB), HSE Books. Retrieved from http://www.maib.gov.uk/cms_resources.cfm?file=/havkong_pub_1994.pdf
- Health and Safety Executive. (2000). *Better alarm handling, Chemical Information Sheet No. 6*. HSE Books. Retrieved from HSE website: <http://www.hse.gov.uk/pubns/chis6.pdf>
- Health and Safety Executive. (2001). *The Ladbroke Grove Rail Enquiry. Part 1 report. The Right Honourable Lord Cullen PC*. London: Her Majesty's Stationery Office. Retrieved from http://www.railwaysarchive.co.uk/documents/HSE_Lad_Cullen001.pdf

- Health and Safety Executive. (2004). *Managing human performance. Human Factors Briefing Note No. 9. Alarm handling*. Retrieved from HSE website: <http://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/09alarms.pdf>
- Health and Safety Executive. (2005). *Inspectors toolkit. Human factors in the management of major accident hazards*. Retrieved from HSE website: <http://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/toolkitintro.pdf>
- Helander, M. G., & Rupp, B. A. (1984). An overview of standards and guidelines for visual displays terminals. *Applied Ergonomics*, 15(3), 185-195. doi: 10.1016/0003-6870(84)90060-7
- Henningsen, A., & Kemmerer, J. P. (1993). Intelligent alarm handling in cement plants - Lessons learned from the nuclear industry. *Record of Technical Papers of 35th IEEE Cement Industry Technical Conference* (pp 165-182), May 23-27, 1993, Toronto, ON, Canada. doi: 10.1109/CITCON.1993.296986
- Hewitt, P. A., & Andow, P. (2009). Improved process performance using best practices in alarm management. *Proceedings of the 8th World Congress of Chemical Engineering (WCCE8)*, August 23-27, 2009, Montreal, Canada. Retrieved from ASM Consortium website: http://www.asmconsortium.net/Documents/WCCE8%20Montreal%20Hewitt_Presentation%20Alarm%20Mgt.pdf
- Higgins, J., Crouch, D., & Luckas, W. J. Jr. (1989). *A value-impact assessment of potential upgrades to control room annunciators* (NUREG/CP-0097) (pp. 307-328). Volume 1. Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0716/ML071690461.pdf>
- Higgins, J., O'Hara, J., Lewis, P., Persensky, J., Bongarra, J., Cooper, S., & Parry, G. (2007). *Guidance for the review of changes to human actions* (NUREG-1764) (1st ed., 2004; 2nd ed., 2007). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0726/ML072640413.pdf>
- Hobbs, A. & Williamson, A. (2002). Skills, rules and knowledge in aircraft maintenance: Errors in context. *Ergonomics*, 45(4), 290-308. doi:10.1080/00140130110116100
- Hol, J. Ø., Førdestrømmen, N. T., Meyer, B. D., & Olsen, T. V. (1994). *Unified MMI design for NORS/ISACS-1, Phase 1* (HWR-399). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Hollifield, B. (2008). Busting the myths of alarm management. *Proceedings of 2008 Pipeline Conference and Cybernetics Symposium*, April 8-10, 2008, Orlando, FL, USA. Retrieved from http://new.api.org/meetings/topics/pipeline/upload/Bill_Hollifield.pdf
- Hollifield, B. (2010). Understanding and applying the ANSI/ISA 18.2 alarm management standard. Houston, TX: PAS. Retrieved from [http://www.pas.com/Downloads-\(1\)/AMORt/SP18.aspx](http://www.pas.com/Downloads-(1)/AMORt/SP18.aspx)
- Hollifield, B., & Habibi, E. (2010). *The alarm management handbook. A comprehensive guide. Practical and proven methods to optimize the performance of alarm management systems* (2nd ed.). Houston, TX: PAS.
- Hollnagel, E., Hunt, G., & Marshall, E. C. (1983). *The experimental validation of the critical safety function monitoring system: preliminary results of analysis* (HWR-111). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Hollnagel, E., & Miberg, A. B. (1999). *Human-centred automation: An explorative study* (HWR-595). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.

- Hollnagel, E., & Øwre, F. (1984). *The NORS/HALO system: Background and methodology for experiment 1* (HWR-90). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Hollo, E. (1977). *Some points of advanced alarm system design* (Risø-M-1908). Roskilde, Denmark: Risø. Retrieved from DTU National Laboratory website: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:92138/datastreams/file_2aeef0c4-a891-4905-8fa5-89126e96b8c2/content
- Hollywell, P. D., & Marshall, E. C. (1994). An experiment to support the design of VDU-based alarm lists for power plant operators. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 183-191). London: Taylor and Francis.
- Holmström, C. B. O., Jacobsson, L., & Henriksson, M. (1993). *Validation of the post-trip disturbance analysis system SAS II at Forsmark nuclear power plant, Sweden* (HWR-329). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Honeywell. (2011a). *Alarm manager* (BR 514). Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/brochures/honeywell-alarm-management-br514.pdf>
- Honeywell. (2011b). *Manage the process, not the alarm* (AR 558). Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/brochures/honeywell-alarm-manager-alarm-management-br588.pdf>
- Honeywell. (2011c). *Alarm management blueprint: Achieving pacesetter status* (WP 637) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/HoneywellAlarmManagerAlarmManagementBlueprint_WP637.pdf
- Honeywell. (2011d). *Alarm management for pipelines* (WP 476) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/HoneywellAlarmManagerAlarmManagementPipelines_WP476.pdf
- Honeywell. (2011e). *Alarm management for pipelines – Part 2: What does this mean to me?* (WP 747) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/honeywell-alarm-manager-alarm-managements-pipelines-wp747.pdf>
- Honeywell. (2011f). *Alarm management: Realizing the value* (WP 534) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/HoneywellAlarmManagerRealizingtheValue_WP534.pdf
- Honeywell. (2011g). *Alarm management standards – Are you taking them seriously?* (WP 817) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/honeywell-alarm-manager-alarm-management-standards-taken-seriously-wp817.pdf>
- Honeywell. (2011h). *Alarm management. What, why, who and how?* (WP 639) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website:

- https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/HoneywellAlarmManagerAlarmManagements4Ws_WP639.pdf
- Honeywell. (2011i). *Keeping the peace (and quiet)* (WP 535) [White paper]. Houston, TX: Honeywell International Inc. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/honeywell-alarm-manager-keeping-the-peace-wp535.pdf>
- Hogg, D. N., Follesø, K., Strand-Volden, F., & Torralba, B. (1995). Development of a situation awareness measure to evaluate advanced alarm systems in nuclear power plant control rooms. *Ergonomics*, 38(11), 2394-2413. doi: 10.1080/00140139508925275
- Hoonhout, H. C. M., & Zwaga, H. J. G. (1993). Operator behavior and supervisory control systems in the chemical process industry. In T. W. van der Schaaf (Ed.), *Trends and tasks in control rooms* (Report EUT/BDK/57). Eindhoven: Eindhoven University of Technology, Graduate School of Industrial Engineering and Management Science. Retrieved from <http://alexandria.tue.nl/repository/books/406029.pdf>
- Hopkins, A. (2000). *Lessons from Longford – The Esso gas plant explosion*. Sydney: CCH. Retrieved from <http://www.futuremedia.com.au/docs/Lessons%20from%20Longford%20by%20Hopkins.PDF>
- Hopkins, A. (2003). An AcciMap of the Esso Australia gas plant explosion. *Proceeding of the Queensland Mining industry Health & Safety Conference 2003. Accepting the Challenge* (pp. 16-20), August 3-6, 2003, Queensland, Australia. Retrieved from http://www.grc.org.au/conference/dbase_upl/03_spk003_Hopkins.pdf
- Huang, F.-H., Hwang, S.-L., Yenn, T.-C., Yu, Y.-C., Hsu, C.-C., & Huang, H.-W. (2006). Evaluation and comparison of alarm reset modes in advanced control room of nuclear power plants. *Safety Science*, 44(10), 935-946. doi: 10.1016/j.ssci.2006.06.002
- Huang, F.-H., Lee, Y.-L., Hwang, S.-L., Yenn, T.-C., Yu, Y.-C., Hsu, C.-C., & Huang, H.-W. (2007). Experimental evaluation of human-system interaction on alarm design. *Nuclear Engineering and Design*, 237(3), 308-315. doi: 10.1016/j.nucengdes.2006.04.027
- Hugo, J. (2012). Computational human performance modeling for alarm system design. *Proceedings of the Eighth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT 2012), July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA.
- Hwang, S.-L., Liang, S.-F. M., Liu, T.-Y. Y., Yang, Y.-J., Chen, P.-Y., & Chuang, C.-F. (2009). Evaluation of human factors in interface design in main control rooms. *Nuclear Engineering and Design*, 239(12), 3069-3075. doi: 10.1016/j.nucengdes.2009.09.006
- Hwang, S.-L., Lin, J.-T., Liang, G.-F., Yau, Y.-J., Yenn, T.-C., & Hsub, C.-C. (2008). Application control chart concepts of designing a pre-alarm system in the nuclear power plant control room. *Nuclear Engineering and Design*, 238(12), 3522-3527. doi: 10.1016/j.nucengdes.2008.07.011
- Hyrskykari, A. (2006). Utilizing eye movements: Overcoming inaccuracy while tracking the focus of attention during reading. *Computers in Human Behavior*, 22(4), 657-671. doi: 10.1016/j.chb.2005.12.013

- IBC (1999). *A two-day seminar on "Safe and reliable control room operations. Alarm System"* (IS 1126), March 18-19, 1999. London, UK: IBC UK Conferences Limited.
- IBC (2000). *Second annual two day seminar and workshops on "Alarm Systems"* (IS 1152), June 28-29, 2000, London, UK. London, UK: IBC Global Conferences Limited.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2004). *IEEE guide for the application of human factors engineering in the design of computer-based monitoring and control displays for nuclear power generating stations* (IEEE Std 1289-1998, R2004). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi: 10.1109/IEEESTD.1998.87894
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010a). *IEEE guide for the application of human factors engineering to systems, equipment, and facilities of nuclear power generating stations and other nuclear facilities* (IEEE Std 1023-1988, R2004, R2010). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi:10.1109/IEEESTD.1988.81612
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010b). *IEEE guide for incorporating human action reliability analysis for nuclear power generating stations* (IEEE Std 1082-1997, R2010). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi: 10.1109/IEEESTD.1997.85518
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010c). *IEEE standard criteria for digital computers in safety systems of nuclear power generating stations* (IEEE Std 7-4.3.2-2003, R2010). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi:10.1109/IEEESTD.2010.5542302
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011a). *IEEE guide for human factors applications of Computerized Operating Procedure Systems (COPS) at nuclear power generating stations and other nuclear facilities of nuclear power generating stations* (IEEE Std 1786-2011). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6029264
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011b). *IEEE guide for the evaluation of human-system performance in nuclear power generating stations* (IEEE Std 845-1988, R1999, R2011). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi:10.1109/IEEESTD.1999.90569
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE standard for software verification and validation* (IEEE Std 1012-1998, R2004, R2012). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6204026
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2006). *Guía técnica de evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos con pantallas de visualización*. Madrid: INSHT. Retrieved from INSHT website: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/pantallas.pdf>
- Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2004). *Annunciator sequences and specifications* (ISA-18.1-1979) (R2004). Research Triangle Park, NC: ISA.
- Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2009). *Management of alarm systems for the process industries* (ISA-18.2) (ANSI/ISA-18.2). Research Triangle Park, NC: ISA.

- Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2010). *Fossil fuel power plant human-machine interface: Hard panel alarms* (ISA RP77.60.02-2000) (R2010). Research Triangle Park, NC: ISA.
- Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2012a). *Alarm systems for batch and discrete processes* (ISA TR18.2.6). Research Triangle Park, NC: ISA.
- Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2012b). *Alarm system monitoring, assessment, and auditing* (ISA TR18.2.5). Research Triangle Park, NC: ISA.
- Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2012c). *Enhanced and advanced alarm methods* (ISA TR18.2.4). Research Triangle Park, NC: ISA.
- International Association of Oil and Gas Producers. (2010). *Instrument and automation standards and committees for the international oil & gas industry* (Report No. 427). London, UK: The International Association of Oil and Gas Producers (OGP). Retrieved from OGP website: <http://www.ogp.org.uk/pubs/427.pdf>
- International Atomic Energy Agency. (1996a). *Proceedings of the International Atomic Energy Agency Specialists' Meeting on Experience and Improvements in Advanced Alarm Annunciation Systems in Nuclear Power Plants* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- International Atomic Energy Agency. (1996b). *Nuclear power plant personnel training and its evaluation. A guidebook* (Technical reports series N° 380). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/5714/Nuclear-Power-Plant-Personnel-Training-and-its-Evaluation-A-Guidebook>
- International Atomic Energy Agency. (1998). *Selection, specification, design and use of various nuclear power plant training simulators* (IAEA-TECDOC-995). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_995_prn.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2001). *Information integration in control rooms and technical offices in nuclear power plants* (IAEA-TECDOC-1252). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1252_prn.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2002). *Instrumentation and control systems important to safety in nuclear power plants. Safety guide* (IAEA safety standards series. Safety Guide No. NS-G-1.3). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1116_scr.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2003). *Means of evaluating and improving the effectiveness of training of nuclear power plant personnel* (IAEA-TECDOC-1358). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1358_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2006). *Authorization of nuclear power plant control room personnel: Methods and practices with emphasis on the use of simulators* (IAEA-TECDOC-1502). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1502_web.pdf

- International Atomic Energy Agency. (2008). *Conduct of operations at nuclear power plants. Safety guide* (IAEA safety standards series No. NS-G-2.14). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1339_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2009). *INES. The international nuclear and radiological event scale. User's manual 2008 edition*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES2009_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2012). *Realización de operaciones en centrales nucleares. Guía de seguridad N° NS-G-2.14*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. Realización de operaciones en centrales nucleares. Retrieved from IAEA website: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1339s_web.pdf
- International Electrical Commission. (1989). *Design for control rooms of NPPs* (IEC 964). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Electrical Commission. (1993). *Man-machine interface – Actuating principles* (IEC 447). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Electrical Commission. (1995a). *Nuclear power plants – Main control room – Application of visual display units (VDU)* (IEC 61772) (2nd ed., 2009). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Electrical Commission. (1995b). *Nuclear power plants – Main control room – Verification and validation of design* (IEC 61771). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Electrical Commission. (2004). *Nuclear power plants – Main control room – Alarm functions and presentation* (IEC 62241). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Electrical Commission. (2009). *Nuclear power plants – Control rooms – Design* (IEC 60964). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Electrical Commission. (2014). *Management of alarms systems for the process industries* (IEC 62682). Geneva, Switzerland: International Electrical Commission.
- International Ergonomics Association (2014). *Definition and domains of ergonomics*. Retrieved from <http://www.iea.cc/whats/index.html>
- International Organization for Standardization. (1999). *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs)* (ISO 9241). Part 1 to 16. 1997-1999. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (1999-2006). *Ergonomic requirements for the design of displays and control actuators* (ISO 9355). Part 1: Human interactions with displays and control actuators (1999). Part 2: Displays (1999). Part 3: Control actuators (2006). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2000a-2006). *Ergonomic design of control centres* (ISO 11064). Part 1: Principles for the design of control centres (2000). Part 2: Principles for the arrangement of control suites (2000). Part 3: Control room layout (1999, 2002). Part 4: Layout and dimensions of workstations (2004). Part 5: Displays and controls (2008). Part 6:

- Environmental requirements for control centres (2005). Part 7: Principles for the evaluation of control centres (2006). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2000b). *Ergonomics of human-system interaction – Human-centred lifecycle process descriptions* (ISO/TR 18529). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2002). *Ergonomics of human-system interaction – Usability methods supporting human-centred design* (ISO/TR 16982). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2002-2003). *Software ergonomics for multimedia user interfaces* (ISO 14915). Part 1: Design principles and framework (2002). Part 2: Multimedia navigation and control (2003). Part 3: Media selection and combination (2002). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2003). *Software engineering – Product quality* (ISO/IEC 9126) (1st ed., 1992; 2nd ed., 2003). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2004). *Ergonomic principles in the design of work systems* (ISO 6385) (1st ed., 1981; 2nd ed., 2004). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2005). *Software engineering – Software product quality requirements and evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE* (ISO/IEC 25000). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2010). *Ergonomics of human-system interaction – Specification for the process assessment of human-system issues* (ISO/TS 18152). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jacob, R. J. K., & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In R. Hyona, J. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movement research*. Oxford, England: North-Holland. Retrieved from <http://www.cs.tufts.edu/~jacob/papers/ecem.pdf>
- Jang, G.-S., Keum, J.-Y., Park, J.-Y., & Kim, Y.-K. (2008). Active alarm processing in a nuclear power plant. *Proceedings of IEEE Symposium on Advanced Management of Information for Globalized Enterprises (AMIGE)* (pp. 1-3), September 28-29, 2008, Tianjin, China. doi: 10.1109/AMIGE.2008.ECP.78
- Jang, G.-S., Seong, D.-H., Keum, J.-Y., Park, H.-Y., & Kim, Y.-K. (2008). The design characteristics of an advanced alarm system for SMART. *Annals of Nuclear Energy*, 35(6), 1006-1015. doi: 10.1016/j.anucene.2007.11.009
- Jang, G.-S., Suh, S.-M., Kim, S.-K., Suh, Y.-S., & Park, J.-Y. (2013). A proactive alarm reduction method and its human factors validation test for a main control room for SMART. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 125-134. doi: 10.1016/j.anucene.2012.07.035
- Jenkinson, J. (1997). Alarm reduction in nuclear power plants: Results of an international survey. *Proceedings of IEE Colloquium on Stemming the Alarm Flood* (Digest No. 1997/136) (pp. 2/1-2/4), June 17, 1997, London. doi: 10.1049/ic:19970740

- Jervis, M. W. (1984). Control and instrumentation of large nuclear power stations. A review of future trends. *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A*, 131(7), 481-515. doi: 10.1049/ip-a-1:19840069
- Jokstad, H., Falt, C. O., Karlsson, T., Kvalem, J., & Skraaning, G. (2002). *Halden Man-Machine Laboratory as of 2002* (HWR-699). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Jönsson, A., & Osvalder, A.-L. (2005). Development of a theoretical cognitive model of the nuclear power plant operator's information process. *Proceedings of Enlarged Halden Programme Group Meeting (EHPG) on "Fuels and Materials, and Man-Technology-Organisation"* (HPR-365), October 16-21, 2005, Lillehammer, Norway. Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Jönsson, A., Osvalder, A.-L., Holmström, C., & Dahlman, S. (2004). Alarm systems in the nuclear industry – Survey of the working situation and identification of future research issues. *Proceedings of Enlarged Halden Programme Group Meeting (EHPG) on "Fuels and Materials, and Man-Technology-Organisation"* (HPR-363), May 9-14, 2004, Sandefjord, Norway. Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8(4), 441-480. doi: 10.1016/0010-0285(76)90015-3
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329-354. doi: 10.1037/0033-295X.87.4.329
- Kaarstad, M. (2004). *Usability evaluation of the HAMBO alarm system* (IFE/HR/E-2004/028). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Kaarstad, M., & Nihlwing, C. (2011). *Usability evaluation of the state based alarm system* (IFE/HR/F-2011/1495). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Kaarstad, M., Nystad, E., & Strand, S. (2011). Work practices and cooperation in a near future and far future operational environment. In A. B. Skjerve & A. Bye (Eds.), *Simulator-based human factors studies across 25-Years. The history of the Halden Man-Machine Laboratory* (pp. 271-286). London, UK: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-0-85729-003-8_17
- Kaarstad, M., & Seim, L. Å. (2004). *Human factors evaluation of the HAMBO alarm system* (IFE/HR/F-2004/1224). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Kaarstad, M., Strand, S., & Nihlwing, C. (2008a). *Halden White Paper "Safe work practices in near future computer-based control rooms: Transparent teamwork"* (HWhP-018). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Kaarstad, M., Strand, S., & Nihlwing, C. (2008b). *Work practices in computer-based control rooms - Insights from workshop with operators* (HWR-892). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Karlsson, T., Meyer, B. D., Jokstad, H., Farbroth, J. E., & Hulsund, J. E. (2002). *The alarm system for the HAMBO BWR simulator* (HWR-702). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Kemeny, J. G. et al. (Chairman) (1979). *Report of the President's Commission on the accident at Three Mile Island. The need for change: the legacy of TMI*, October, 1979. Washington, D.C. Retrieved from <http://www.threemileisland.org/downloads/188.pdf>

- Kim, I. S., & O'Hara, J. M. (1993). Classification of alarm processing techniques and human performance issues (BNL-NUREG-48669). *Proceedings of Conference Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Man-Machine Interface Technologies*, April 18-21, 1993, Oak Ridge, TN, USA. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10152924>
- Kim, J.-T., Kwon, K.-C., Hwang, I.-K., Lee, D.-Y., Park, W.-M., Kim, J.-S., & Lee, S.-J. (2001). Development of advanced I&C in nuclear power plants: ADIOS and ASICS. *Nuclear Engineering and Design*, 207(1), 105-119. doi: 10.1016/S0029-5493(00)00430-1
- Kim, J.-T., Lee, D.-Y., Hwang, I.-K., Park, J.-C., Na, N. J., & Song, S.-J. (1996). An evaluation approach for alarm processing improvement. *Proceedings of the International Atomic Energy Agency Specialist Meeting on "Experience and improvements in advanced alarm annunciation systems in NPP"* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 291-299), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- Kinkade, R. G., & Anderson, J. (1984). *Human factors guide for nuclear power plant control room development* (EPRI NP-3659). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-3659>
- Kirk, R. E. (1995). *Experimental design. Procedures for the behavioral sciences*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing Company.
- Kirwan, B. (2001). Coping with accelerating socio-technical systems. *Safety Science*, 37(2-3), 77-107. doi: 10.1016/S0925-7535(00)00044-8
- Kirwan, B., Kaarstad, M., Hauland, G., & Follesø, K. (1995). See no evil, hear no evil, speak no evil: Verbal protocol analysis, eye movement analysis, and nuclear power plant diagnosis. *Contemporary ergonomics: Proceedings of the Ergonomics Society's Annual Conference* (pp. 249-255). London: Taylor & Francis.
- Kirwan, B., Reed, J., & Litherland, M. (1990). The development of an ergonomics standard for the design of operator interfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers of the International Conference on Quality Management in the Nuclear Industry: the Human Factor* (IMechE 1990-11) (pp. 73-78), October 17-18, 1990, London, UK.
- Kitamura, M., Fujita, Y., & Yoshikawa, H. (2005). Review of international standards related to the design for control rooms on nuclear power plants. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 42(4), 406-417. doi: 10.1080/18811248.2005.9726408
- Kletz, T. (2001). *Learning from accidents* (3rd ed.). Oxford, UK: Gulf Professional Publishing.
- Kluge, A., Sauer, J., Schüler, K., & Burkolter, D. (2009). Designing training for process control simulators: A review of empirical findings and current practices. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(6), 489-509. doi: 10.1080/14639220902982192
- Koene, J., & Vedam, H. (2000). Alarm management and rationalization. *Proceedings of the Third International Conference on Loss Prevention (Safety, Health & Environment) in the Oil, Chemical and Process Industries*, December 4-8, 2000, Society of Loss Prevention in the Oil, Chemical and Process Industries Singapore. Retrieved from ASM Consortium website: <http://www.asmconsortium.net/resources/publications/Pages/default.aspx>

- Kondaveeti, S. R., Izadi, I., Shah, S. L., Black, T., & Chen, T. (2012). Graphical tools for routine assessment of industrial alarm systems. *Computers and Chemical Engineering*, 46, 39-47. doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.042
- Kondaveeti, S. R., Izadi, I., Shah, S. L., Shook, D. S., Kadali, R., & Chen, T. (2013). Quantification of alarm chatter based on run length distributions. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(12), 2550-2558. doi: 10.1016/j.cherd.2013.02.028
- Kortlandt, D., & Kragt, H. (1978). Ergonomics in the struggle against “alarm inflation” in process control systems – Many questions, few answers. *Journal A*, 19(3), 135-142. Retrieved from <http://alexandria.tue.nl/repository/freearticles/334361.pdf>
- Kragt, H. (1983). *Operator tasks and annunciator systems. Studies in the process industry*. (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology). Retrieved from <http://alexandria.tue.nl/extra1/PRF4A/8309712.pdf>
- Kragt, H. (1984). A comparative simulation study of annunciator systems. *Ergonomics*, 27(9), 927-945. doi: 10.1080/00140138408963572
- Kragt, H., & Bonten, J. (1983). Evaluation of a conventional process-alarm system in a fertilizer plant. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(4), 586-600. doi: 10.1109/TSMC.1983.6313147
- Laarni, J., & Norros, L. (2006). Control room modernization at Finnish nuclear power plants – Two projects compared. *Proceedings of the Fifth ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technology (NPIC&HMIT)* (pp. 890-897), November 12-16, 2006, Albuquerque, NM, USA.
- Labarthe J.-P., & De la Garza, C. (2011). The human factors evaluation program of a control room: The French EPR approach. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 21(4), 331-349. doi: 10.1002/hfm.20227
- Laberge, J. C., Bullemer, P., Tolsma, M., & Reising, D. V. C. (2014). Addressing alarm flood situations in the process industries through alarm summary display design and alarm response strategy. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(3), 395-406. doi: 10.1016/j.ergon.2013.11.008
- Landry, S. J., & Divvela, A. (2007). Empirical evidence for a model of operator reaction to alerting systems. In D. Harris (Ed.), *Proceedings of the 7th International Conference Human-Computer Interaction (HCI) (EPCE 2007)* (pp. 522-530), July 22-27, 2007, Beijing, China. doi: 10.1007/978-3-540-73331-7_57
- Lang, A. W. (2007). Validation plans for a modernized main control room. *Proceedings of IAEA Technical Meeting on Integrating Analog and Digital Instrumentation and Control Systems in Hybrid Main Control Rooms at Nuclear Power Plants*, October 29 - November 2, 2007, Toronto, ON, Canada. Retrieved from IAEA website: http://entrac.iaea.org/I-and-C/TM_TORONTO_2007/Presentations/3A-TUESDAY_9-16_19-21_31/21-LANG-PRESENTATION%2021-%20Validation%20Plans%20for%20a%20Modernized%20%20.ppt#326.1,
- Lang, A. W. (2009). Preparing for the validation of a modernized main control room. *Proceedings of the Sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant*,

- Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT) (pp. 2402-2407), April 5-9, 2009, Knoxville, TN, USA.
- Lang, A. W. (2010). TWICE integrated HSI validation. In Braarud, P. Ø., Nystad, E., Strand, S., Skråning, G., Bye, A., Hildebrandt, M., & Massaiu, S. (2010). *The Halden Reactor Project meeting on Integrated System Validation (ISV) – Status of current approaches to ISV and R&D needs* (HWR-939) (pp. 73-82). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Lang, A. W., Roth, E. M., Bladh, K., & Hine, R. (2002). Using a benchmark-referenced approach for validating a power plant control room: Results of the baseline study. *Proceedings of the 46th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 46(23), 1878-1882, September 30 - October 4, 2002, Baltimore, MD, USA. doi: 10.1177/154193120204602302
- Larsson, J. E. (2007). On-line root cause analysis for nuclear power plant control rooms. *Proceedings of the International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for the 21st Century* (ISSNP), July 9-11, 2007, Tsuruga, Fukui, Japan. Retrieved from <http://www.goalart.com/publications/2007-ISSNP.pdf>
- Larsson, J. E., Öhman, B., Calzada, A., & DeBor, J. (2006). New solutions for alarm problems. *Proceedings of the Fifth ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technology* (NPIC&HMIT), November 12-16, 2006, Albuquerque, NM, USA.
- Lee, C.-M., Tsai, W.-C., Wong, K. W., & Pang, T. (2009). The new generation nuclear power plant simulator – The Lungmen ABWR simulator. *Proceedings of the Sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant, Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT) (pp. 2202-2213), April 5-9, 2009, Knoxville, TN, USA.
- Lee, H.-C., Oh, I.-S., Sim, B.-S., Koo, I.-S., Kim, J.-T., Lee, K.-Y., & Park, J.-K. (1998). Operator performance comparison of two VDT-based alarm systems. *Proceedings of Specialists Meeting on Human Performance in Operational Events* (NEA/CSNI/R(98)16) (pp. 283-287), October 13-17, 1997, Chattanooga, TN, USA. Retrieved from IAEA website: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/026/44026272.pdf
- Lee, J.-W., Kim, J.-T., Park, J.-C., Hwang, I.-K., & Lyu, S.-P. (2010). Computer-based alarm processing and presentation methods in nuclear power plants. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 4(5), 495-499. Retrieved from <http://waset.org/publications/675/computer-based-alarm-processing-and-presentation-methods-in-nuclear-power-plants>
- Lee, S. J., & Jung, W. (2013). Task analysis of soft control operations using simulation data in nuclear power plants. In S. Yamamoto (Ed.), *Proceedings of the 15th International Conference on Human Interface and the Management of Information. Information and Interaction for Health, Safety, Mobility and Complex Environments*. Part 2 (pp. 524-529), July 21-26, 2013, Las Vegas, NV, USA. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-39215-3_60
- Lee, S. J., & Seong, P. H. (2014). Design of an integrated operator support system for advanced NPP MCRs: Issues and perspectives. In H. Yoshikawa & Z. Zhang (Eds.), *Progress of Nuclear Safety for Symbiosis and Sustainability: Advanced Digital Instrumentation, Control and Information Systems for Nuclear Power Plants*. Part I (pp. 11-26). Tokyo, Japan: Springer Japan 2014. doi: 10.1007/978-4-431-54610-8_2

- Lees, F. P. (1974). Research on the process operator. In E. Edwards & F. P. Lees (Eds.), *The human operator in process control* (pp. 386-425). London: Taylor and Francis.
- Lees, F. P. (1983). Process computer alarm and disturbance analysis: Review of the state of the art. *Computers and Chemical Engineering*, 7(6), 669-694. doi: 10.1016/0098-1354(83)85021-2
- Leger, R., Malcolm, S., & Davey, E. (2006). The advanced CANDU reactor annunciation system compliance with IEC standard and US NRC guidelines. *Proceedings of the Fifth ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technology* (NPIC&HMIT), November 12-16, 2006, Albuquerque, NM, USA. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/ANS_2006_CAMLS_Compliance.pdf
- Leikkonen, I. (1983). *Process description of the NORS simulator* (HWR-31). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Li, X., McKee, D. J., Horberry, T., & Powell, M. S. (2011). The control room operator: The forgotten element in mineral process control. *Minerals Engineering*, 24, 894-902. doi: 10.1016/j.mineng.2011.04.001
- Licao, D., Li, Z., Pengcheng, L., Hong, H., & Yanhua, Z. (2014). Study on human errors in DCS of a nuclear power plant. *Proceedings of Probabilistic Safety Assessment and Management* (PSAM 12), June 22-27, 2014, Honolulu, Hawaii, USA. Retrieved from http://psam12.org/proceedings/paper/paper_136_1.pdf
- Lillo, J. (2000). *Ergonomía: Evaluación y diseño del entorno visual*. Madrid: Alianza Editorial.
- Lin, C. J., Shiang, W.-J., Chuang, C.-Y., & Liou, J.-L. (2014). Applying the skill-rule-knowledge framework to understanding operators' behaviors and workload in advanced main control rooms. *Nuclear Engineering and Design*, 270, 176-184. doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.12.051
- Lind, M. (1991). *Effects of sequential and simultaneous presentation of information* (Report No. 19/91). Uppsala, Sweden: Uppsala University Center for Human-Computer Studies. Retrieved from <https://www.it.uu.se/research/hci/publications/papers/19/19.pdf>
- Long, T., & Davey, E. C. (1996). Darlington annunciation: User information needs, current experience and improvement priorities. *Proceedings of the International Atomic Energy Agency Specialist meeting on "Experience and improvements in advanced alarm annunciation systems in NPP"* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 63-77), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada. Retrieved from http://www.crew-ss.com/portfolio/download/IAEA96_DNGS_Ann_Exp.pdf
- Lupton, L. R. (1996). Welcoming remarks and overview of IAEA specialists' meeting. *Proceedings of the International Atomic Energy Agency Specialists' Meeting on Experience and Improvements in Advanced Alarm Annunciation Systems in Nuclear Power Plants* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- Luquetti dos Santos, I. J. A., Farias, M. S., Ferraz, F. T., Haddad, A. N., & Hecksher, S. (2013). Human factors applied to alarm panel modernization of nuclear control room. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1308-1320. doi: 10.1016/j.jlp.2013.07.017
- Luquetti dos Santos, I. J. A., Teixeira, D. V., Ferraz, F. T., & Carvalho, P. V. R. (2008). The use of a simulator to include human factors issues in the interface design of a nuclear power plant control room. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21, 227-238. doi: 10.1016/j.jlp.2007.04.006

- Malcolm, S., & Harmon, D. L. (2006). Advanced control room design. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(6), 43-48. doi:10.1109/PAE-M.2006.247869
- Malone, T. B. (1980). *Human factors evaluation of control room design and operator performance at Three Mile Island* (NUREG/CR-1270). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Marcos, M. C., & González-Caro, C. (2010). Comportamiento de los usuarios en la página de resultados de los buscadores. Un estudio basado en eye tracking. *El profesional de la información*, 19(4), 348-358. doi: 10.3145/epi.2010.jul.03.
- Marcus, R. (2006). Human factors in pediatric anesthesia incidents. *Pediatric Anesthesia*, 16(3), 242-250. doi:10.1111/j.1460-9592.2005.01771.x
- Marshall, E. C. (1982). *A preliminary evaluation of the HALO system for alarm handling* (HWR-83). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Marshall, E. C., & Baker, S. (1994). Alarms in nuclear power plant control rooms: Current approaches and future design. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 183-191). London: Taylor and Francis.
- Marshall, E. C., Baker, S., & Leikkonen, I. (1985). *Introduction to the NORS simulator - A self-tutored training program* (HWR-136). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Marshall, E. C., Reiersen, C., & Øwre, F. (1987). Operator performance with the Halo II advanced alarm system for nuclear power plants - A comparative study. In M. C. Majumdar, D. Majumdar, & J. I. Sackett (Eds.), *Proceedings of the American Nuclear Society Topical Meeting on Artificial Intelligence and Other Innovative Computer Applications in the Nuclear Industry* (pp. 353-360), August 31 - September 2, 1987, Snowbird, UT, USA. doi: 10.1007/978-1-4613-1009-9_44
- Martínez Heras, J. M. (2007). *Aplicaciones de la tecnología eye tracking (seguimiento de la mirada)*. Ergoestudio. Retrieved from <http://www.distintiva.com/lab/aplicaciones-de-la-tecnologia-eye-tracking-seguimiento-de-la-mirada/>
- Martínez, A. B., & Cueva, J. M. (2001). Estándares y guías. In J. Lorés (Ed.), *Curso de introducción a la interacción persona-ordenador* (pp. 1-31). Retrieved from <http://aipo.es/libro/pdf/09Estand.pdf>
- Marvan, M. (2005). *Alarm management blunders: Avoiding 12 costly mistakes*. Matrikon INc, Canada. Retrieved from http://www.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/wp_032_matrikon_ami_12mistakes.pdf
- Matsushita, K., Minamiyama, H., Okazaki, A., Watanabe, M., Suzuki, H., & Tani, M. (1988). Improvement of PWR control room design. *Proceedings of Man-Machine Interface in the Nuclear Industry* (pp. 593-603), February 15-19, 1988, Tokyo, Japan. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- Matthews, M., Martin, L. B., Tario, C. D., & Brown, A. L. (2009). *Non-intrusive alert system for maritime anomalies: Literature review and the development and assessment of interface design concepts* (DRDC CR2009-042). Toronto, Canada: Defence Research and Development Canada (DRDC). Retrieved from <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a505334.pdf>

- Mattiasson, C. (1999). The alarm system from the operator's perspective. *Proceedings of an International Conference on Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centers*, Institution of Electrical Engineers Conference (Publication Number 463) (pp. 217-221), June 21-23, 1999, University of Bath, UK. Retrieved from ASM Consortium website: <https://www.asmconsortium.net/Documents/TheAlarmSystemFromTheoperat.pdf>
- Maxwell, S. E., & Delaney, H. D. (2000). *Designing experiments and analyzing data. A model comparison perspective*. London, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
- Meister, D. (1995). Cognitive behavior of nuclear reactor operators. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 16(2), 109-122. doi: 10.1016/0169-8141(94)00089-L
- Metzger, D. (2009). *ASM alarm management guidelines and ISA-18.2: How do they stack up? The ISA standard and the ASM consortium guidelines both offer important information about alarm management. Although their approaches differ, they complement one another*. Retrieved from <http://www.controlglobal.com/articles/2009/ASMAAlarmManagement0910.html?page=full>
- Metzger, D. (2010). How ISA 18.2 life cycle addresses the operating problems typical of poor alarm management. *Proceedings of ISA Safety and Security Symposium*, April 28-29, 2010. New Orleans, LA, USA. Retrieved from Honeywell website: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/whitepapers/ISA-18.2-Addresses-Alarm-OperatingProblems-eop.pdf>
- Miazza, P., Torralba, B., Kårstad, T., Moum, B. R., & Follesø, K. (1993). *CASH: Computerised alarm system for HAMMLAB – An outline of required functions* (HWR-362). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Miberg, A. B. (1998a). *Experiment Key for the IPSN-Experiment*. Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Miberg, A. B. (1998b). *The IPSN-experiment. Log of the occurrences in the six scenarios and a specification of data obtained and lost*. Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Miberg-Skjerve, A. B., & Skraaning, G. (2004). The quality of human-automation cooperation in human-system interface for nuclear power plants. *International Journal of Human-Computer Studies*, 6(5), 649-677. doi: 10.1016/j.ijhcs.2004.06.001
- Mikkelsen, C., Johansson, J., & Rissanen, M. (2011). Interactive information visualization for sensemaking in power grid supervisory control systems. In E. Banissi, S. Bertschi, R. Burkhard, U. Cvek, M. Eppler, C. Forsell, G. Grinstein, J. Johansson, S. Kenderdine, F. T. Marchese, C. Maple, M. Trutschl, M. Sarfraz, L. Stuart, A. Ursyn, & T. G. Wyeld (Eds.), *Proceedings of 15th International Conference on Information Visualisation* (pp. 119-126), July 13-15, 2011, London, UK. doi: 10.1109/IV.2011.100
- Moray, N. & Huey, B. M. (Eds.) (1988). *Human factors research and nuclear safety. Panel on human factors research needs in nuclear regulatory research*. Washington, D.C.: National Academy Press. Retrieved from http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=789&page=R1
- Moray, N. (1981). The role of attention in the detection of errors and the diagnosis of failures in man-machine systems. In J. Rasmussen & W. B. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failure* (pp.185-198). New York, NY: Plenum Press.

- Moray, N., & Rotenberg, I. (1989). Fault management in process control: Eye movements and action. *Ergonomics*, 32(11), 1319-1342. doi: 10.1080/00140138908966910
- Moulton, B. D. (2009). Enabling safer design via improved understandings of knowledge-related hazards: A role for cross-disciplinarity. *Australian Journal of Engineering Education*, 15(3), 117-127. Retrieved from http://www.engineersmedia.com.au/journals/aaee/pdf/AJEE_15_3_Moulton.pdf
- Moum, B. R., Decurnex, C., Førdestrømmen, N. T., Karlsen, T. V., & Olsen, T. V. (1996). *CASH: The new alarm system in HAMMLAB* (HWR-480). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Moum, B. R., Førdestrømmen, N. T., & Saarni, R. (1998). *Alarm system CASH: Lessons learned based on operators feedback and designers' experiences* (HWR-535). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- MPR Associates. (1985). *Power plant alarm systems: A Survey and recommended approach for evaluating improvements* (EPRI NP-4361). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- MPR Associates. (1988). *An evaluation of alternative power plant alarm presentations* (EPRI NP-5693). Vols. 1&2. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Mumaw, R. J., Roth, E. M., Vicente, K. J., & Burns, C. M. (2000). There is more to monitoring a nuclear power plant than meets the eye. *Human Factors*, 42(1), 36-55. doi: 10.1518/001872000779656651
- Munipov, V. M. (1984). The development of the scientific basis of ergonomics norms and requirements. *Applied Ergonomics*, 15(3), 179-183. doi: 10.1016/0003-6870(84)90059-0
- Murdock, B. B. (1962). The serial position effect in free recall. *Journal of Experimental Psychology*, 64(5), 482-488. doi: 10.1037/h0045106
- Nachreiner, F. (1995). Standards for ergonomics principles relating to the design of work systems and to mental workload. *Applied Ergonomics*, 26(4), 259-263. doi: 10.1016/0003-6870(95)00029-C
- Nachreiner, F., Nickel, P., & Meyer, I. (2006). Human factors in process control systems: The design of human-machine interfaces. *Safety Science*, 44(1), 5-26. doi: 10.1016/j.ssci.2005.09.003
- NAMUR (2003). *Alarm management* (NA 102). Germany: NAMUR Registered Office.
- NASA (1995). *Man-systems integration standards* (NASA-STD-3000) (Revision B). Vols. 1 & 2. Houston: NASA Lyndon B. Johnson Space Center. Retrieved from http://everyspec.com/NASA/NASA-NASA-STD/NASA-STD-3000B_VOL-1_16180/
- Naser, J. A., & Morris, G. (2004). Guidance for nuclear power plant control room and human-system interface modernization. *Proceedings of Americas Nuclear Energy Symposium (ANES) 2004. Building Bridges to Greater Cooperation*, October 3-6, 2004, Miami Beach, FL, USA. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/840373>
- Ness, E., & Berg, Ø. (1990). *Detailed diagnosis based on early fault detection* (HWR-267). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Nihlwing, C., & Kaarstad, M. (2012). The development and usability test of a state based alarm system for a nuclear power plant simulator. *Proceedings of the Eighth American Nuclear*

- Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)*, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA.
- Nihlwing, C., & Kaarstad, M. (2013). *A state-based alarm system for HAMBO (HWR-1065)*. Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Nimmo, I. (2005). Distributed Control Systems: Rescue your plant from alarm overload. *Chemical Processing*, January. pp. 5. Retrieved from <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2005/209/?show=all>
- Nimmo, I. (2006). *Alarm management and graphics projects*. User centered design services, LLC. Retrieved from <https://www.controlglobal.com/assets/13WPpdf/130128-nimmo-alarm-mgmt.pdf>
- Nimmo, I. (2008). Situation critical. *Hydrocarbon Engineering*, December. Retrieved from <http://www.energyglobal.com/magazines/latestissue/hydrocarbon-engineering.aspx>
- Niwa, Y., & Hollangel, E. (2001). Enhancing operator control by adaptive alarm presentation. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 367-384. doi: 10.1207/S15327566IJCE0503_14
- Norman, D. A. (1981). Categorization of action slips. *Psychological Review*, 88(1), 1-15. doi: 10.1037/0033-295X.88.1.1
- Norman, D. A. (1983). Design rules based on analyses of human error. *Communications of the ACM*, 26(4), 254-258. doi:10.1145/2163.358092
- Norwegian Petroleum Directorate (NPD) (2001). *Principles for alarm system design (YA-711)*. Retrieved from Petroleum Safety Authority Norway website: http://www.ptil.no/getfile.php/Regelverket/Alarm_system_design_e.pdf
- Noyes, J. (2001). Human error. In J. Noyes & M. Bransby (Eds.), *People in control. Human factors in control room design* (pp. 3-15). London: The Institution of Electrical Engineers. doi: 10.1049/PBCE060E_ch1
- North American Electric Reliability Council. (2004). *Technical analysis of the August 14, 2003, blackout: What happened, why, and what did we learn?* Report to the NERC Board of Trustees by the NERC steering group. Retrieved from http://www.nerc.com/docs/docs/blackout/NERC_Final_Blackout_Report_07_13_04.pdf
- Nuclear Regulatory Commission. (1983). *U.S. Nuclear Regulatory Commission human factors program plan (NUREG-0985)*. Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Nuclear Regulatory Commission. (2007). *Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants. Chapter 18. Human factors engineering (NUREG-0800)*. (Rev. 0, 1996; Rev. 1, 2004; Rev. 2 2007). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0706/ML070670253.pdf>
- Nuclear Regulatory Commission. (2009). *Background on the Three Mile Island accident* [Fact sheet]. Retrieved from NRC website: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>
- O'Brien, L., & Woll, D. (2004). *Alarm management strategies*. Dedham, MA: ARC Advisory Group. Retrieved from <http://www.yokogawa.com/be-nl/cp/pdf/ARC-AlarmStrat.pdf>

- O'Hara, J. M. (1994). *Advanced human-system interface design review guideline* (NUREG/CR-5908). Vols. 1 & 2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10175091>
<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10175176>
- O'Hara, J. M. (1996). Advanced alarm system design and human performance: Guidance development and current research. *Proceedings of International Atomic Energy Agency Specialist Meeting on "Experience and Improvements in Advanced Alarm Annunciation Systems in NPP"* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 92-108), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- O'Hara, J. M., & Brown, W. S. (1991). Nuclear power plant alarm systems: Problems and issues. *Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 35(17), 1233-1237, September 2-6, 1991, San Francisco, CA, USA. doi: 10.1177/154193129103501713
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Hallbert, B., Skråning, G., Persensky, J. J., & Wachtel, J. (1998). The effects of an experimental evaluation of alarm processing and display characteristics. *Proceedings of the Man-Technology-Organisation of the Enlarged Halden Programme Group Meeting* (EHPG) (HPR-350), March 15-20, 1998, Lillehammer, Norway. Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Hallbert, B., Skråning, G., Persensky, J. J., & Wachtel, J. (2000). *The effects of alarm display, processing, and availability on crew performance* (NUREG/CR-6691). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003770890.pdf>
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Higgins, J. C., & Stubler, W. F. (1994). *Human factors engineering guidance for the review of advanced alarm systems* (NUREG/CR-6105). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10189333>
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Higgins, J. C., Persensky, J. J., Lewis, P. M., & Bongarra, J. (2002). Updating the NRC's guidance for human factors engineering reviews. In J. J. Persensky, B. Hallbert, & H. Blackman (Eds.), *Proceeding of the IEEE Seventh Conference on Human Factors and Power Plants. New Century, New Trends* (pp. 4-22 - 4-27), September 15-19, 2002, Scottsdale, AZ, USA. doi: 10.1109/HFPP.2002.1042842
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Lewis, P. M., & Persensky, J. J. (2001). Your design probably needs more VDU's. *Proceedings of 45th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 45(24), 1718-1722, October 8-12, 2001, Minneapolis, MN, USA. doi: 10.1177/154193120104502404
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Lewis, P. M., & Persensky, J. J. (2002a). *The effects of interface management tasks on crew performance and safety in complex, computer-based systems: Overview and main findings* (Vol. 1) / *Detailed analysis* (Vol. 2) (NUREG-CR/6690). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0225/ML022520381.pdf>
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0225/ML022540807.pdf>
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Lewis, P. M., & Persensky, J. J. (2002b). *Human-system interface design review guidelines* (NUREG-0700). Revision 0 (NRC. (1981). *Guidelines for control room design reviews*), revision 1 (NRC. (1996). *Human-system interface design review*

- guideline*), revision 2 (2002). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0217/ML021700337.pdf>
- O'Hara, J. M., & Hall, R. E. (1992). Advanced control rooms and crew performance issues: Implications for human reliability. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 39(4), 919-923. doi: 10.1109/23.159733
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., & Brown, W. S. (2009). Identification and evaluation of human factors issues associated with emerging nuclear plant technology. *Nuclear Engineering and Technology*, 41(3), 225-236. doi: 10.5516/NET.2009.41.3.225
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., Brown, W. S., & Fink, R. (2004). *Human performance issues in advanced reactors* (BNL Technical Report No: Y6646-T4-11/03). Upton, NY: Brookhaven National Laboratory.
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., Brown, W. S., & Fink, R. (2008). *Human factors considerations with respect to emerging technology in nuclear power plants* (BNL-79947-2008). Upton, NY: Brookhaven National Laboratory. Retrieved from BNL website: <http://www.bnl.gov/isd/documents/41665.pdf>
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., Brown, W. S., Fink, R., Persensky, J. J., Lewis, P., Kramer, J., & Szabo, A. (2008). *Human factors considerations with respect to emerging technology in nuclear power plants* (NUREG/CR-6947). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0830/ML083090338.pdf>
- O'Hara, J. M., Higgins, J., Brown, W. S., Kramer, J., & Persensky, J. J. (2004). Examining concept of operations in future plants. *Proceedings of Fourth International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation Control and Human Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT), September 19-22, 2004, Columbus, OH. Retrieved from BNL website: <http://www.bnl.gov/isd/documents/26496.pdf>
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., & Fleger, S. (2011). Updating human factors engineering guidelines for conducting safety reviews of nuclear power plants. *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 55(1), 2015-2019, September 19-23, 2011, Las Vegas, NV, USA. doi: 10.1177/1071181311551420
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., & Fleger, S. (2012). Human factors engineering program review model (NUREG-0711) revision 3: Update methodology and key revisions. *Proceedings of the Eighth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT), July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA.
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., Fleger, S. A., & Pieringer, P. A. (2012). *Human factors engineering program review model* (NUREG-0711). Rev. 0 (O'Hara, J. M., Higgins, J. C., Stubbler, W.F., Goodman, C., Eckenrode, R. J., Bongarra, J. P., & Galletti, G. S., 1994), Rev. 1 (O'Hara J. M., Higgins, J. C., Persensky J. J., Lewis, P. M., & Bongarra, J. P., 2002), Revision 2 (O'Hara J. M., Higgins, J. C., Persensky J. J., Lewis, P. M., & Bongarra, J. P., 2004), Revision 3 (2012). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1232/ML12324A013.pdf>
- O'Hara, J. M., Higgins, J. C., & Kramer, J. (2000). *Advanced information systems design: Technical basis and human factors review guidance* (NUREG/CR-6633). Washington, D.C.: U.S.

- Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003704877.pdf>
- O'Hara, J. M., Higgins, J., Stubler, W. F., & Kramer, J. (2000). *Computer-based procedure systems: Technical basis and human factors review guidance* (NUREG/CR-6634). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003704853.pdf>
- O'Hara, J. M., Persensky, J. J., & Bongarra, J. (2006). Plant experience with digital control room upgrades: Lessons learned for advanced reactors. *Proceedings of the Workshop on Future Control Station Designs and Human Performance Issues in Nuclear Power Plants* (NEA/CSNI/R(2007)8), May 8-10, 2006, Haden, Norway. Retrieved from OECD website: <http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2007/csni-r2007-8.pdf>
- O'Hara, J. M., Persensky, J. J., & Szabo, A. (2006). Development of human factors engineering guidance for safety evaluations of advanced reactors. *Proceedings of ANS 2006 Winter Meeting and Nuclear Technology Expo*, November 12-16, 2006, Albuquerque, NM, USA. Retrieved from BNL website: <http://www.bnl.gov/isd/documents/32656.pdf>
- O'Hara, J. M., Pirus, D., & Beltracchi, L. (2004). Information display: Considerations for designing computer-based display systems. *Proceedings of Fourth International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation Control and Human Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT), September 19-22, 2004, Columbus, OH, USA.
- O'Hara, J. M., Stubler, W. F., & Higgins, J. C. (2002). Human factors evaluation of hybrid human-system interfaces in nuclear power plants. In S. G. Charlton & T. B. O'Brien (Eds.), *Handbook of human factors testing and evaluation* (pp. 363-386). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- O'Hara, J. M., Stubler, W., Higgins, J. C., & Brown, W. S. (1997). *Integrated system validation: Methodology and review criteria* (NUREG/CR-6393). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from BNL website: http://www.bnl.gov/humanfactors/files/pdf/NUREG_CR-6393.pdf
- O'Hara, J. M., Wachtel, J., & Persensky, J. J. (1995). Advanced alarm systems: Display and processing issues. *Proceedings of the Topical Meeting on Computer-Based Human Support Systems: Technology, Methods, and Future* (pp. 160-167). La Grange Park, IL, USA: ANS. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/83872>
- Occupational Safety and Health Administration. (1992). *OSHA Standard Process safety management of highly hazardous chemicals* (Standard CFR 1910.119). Washington, D.C.: U.S. Department of Labour. Retrieved from OSHA website: http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9760.
- Occupational Safety and Health Administration. (2009). *OSHA Instruction Petroleum refinery process safety management national emphasis program* (Instruction CPL 03-00-010). Washington, D.C.: Directorate of Enforcement Programs (DEP). Retrieved from OSHA website: https://www.osha.gov/OshDoc/Directive_pdf/CPL_03-00-010.pdf
- Ogden-Swift, A. (2011). Advances in abnormal situation management. *Proceedings of IChemE Advances in Process Control 9 Conference* (APC9), September 19-20, 2011, York, UK.

- Retrieved from ASM Consortium website:
http://www.asmconsortium.net/Documents/Advances%20in%20Abnormal%20Situation%20Management_OgdenSwift_2011_APC9.pdf
- Organisation for Economic Cooperation and Development, Environment Directorate. (2008). *Report of the OECD-CCA workshop on human factors in chemical accidents and incidents* (OECD Environment, Health and Safety Publications. Series on Chemical Accidents Number 20. ENV/JM/MONO(2008)6). Retrieved from OECD website:
[http://search.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=env/jm/mono\(2008\)6](http://search.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=env/jm/mono(2008)6)
- Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, Committee on Nuclear Regulatory Activities. (2004). *Nuclear regulatory challenges related to human performance* (NEA No. 5334). Retrieved from OECD website: <https://www.oecd-nea.org/nsd/reports/2004/nea5334-human-performance.pdf>
- Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations. (2009a). *CSNI technical opinion papers No. 10. The role of human and organisational factors in nuclear power plant modifications* (NEA/CSNI/R(2008)11). Retrieved from OECD website: <http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2008/csni-r2008-11.pdf>
- Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations. (2009b). *CSNI technical opinion papers No. 12. Research on human factors in new nuclear plant technology* (NEA/CSNI/R(2009)7). Retrieved from OECD website: <http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2009/csni-r2009-7.pdf>
- Osvalder, A.-L., & Alm, H. (2011). The alarm problem - Some ideas for improvement. In J. Lindfors, M. Savolainen, & S. Väyrynen (Eds.), *Proceedings of 43rd Annual Conference of the Nordic Ergonomics Society* (NES2011) (pp. 423-427), September 18-21, 2011, Oulu, Finland. Retrieved from http://www.kotu.oulu.fi/nas2011/docs/Proceedings_NES2011_Oulu.pdf
- Øwre, F. (2011). The history of HAMMLAB. In A. B. Skjerve & A. Bye (Eds.), *Simulator-based human factors studies across 25 years. The history of the Halden Man-Machine Laboratory* (pp.13-42). London: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-0-85729-003-8_2
- Øwre, F., Holmström, C. B. O., Stokke, E., Krogsäter, M., Larsen, J. S., Nilsen, S., Forsman, T., Stenmark, J.-E., Matsson, Å., Sandén, P.-O., Jacobsson, L., & Söderman, E. (1990). *Safety assessment and post trip guidance – The SAS II system – System description, user interface and its proposed validation program* (HWR-262). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Øwre, F., Molteberg, G., Nielsen, S., & Porkholm, K. (1983). *Preliminary study for a HALO alarm system implementation on the NORS simulator* (HWR-94). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Øwre, F., Nilsen, S., & Meyer, B. D. (1991). *Experience gained from developing the SAS II system for Forsmark unit 2* (HWR-283). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Øwre, F., & Tamayama, K. (1982). *Methodologies for developing alarm logic in a HALO system* (HWR-80). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.

- Parasuraman, R., & Riley, V. A. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39(2), 230-253. doi: 10.1518/001872097778543886
- Parasuraman, R., & Wickens, C. D. (2008). Humans: Still vital after all these years of automation. *Human Factors*, 50(3), 511-520. doi: 10.1518/001872008X312198
- Parsons, K. C. (1995). Ergonomics and international standards. Introduction, brief review of standards for anthropometry and control room design and useful information. *Applied Ergonomics*, 26(4), 239-247. doi: 10.1016/0003-6870(95)00040-J
- Parsons, K. C., Shackel, B., & Metz, B. (1995). Ergonomics and international standards. History, organizational structure and method of development. *Applied Ergonomics*, 26(4), 249-258. doi: 10.1016/0003-6870(95)00028-B
- Paté-Cornell, M. E. (1993). Learning from the Piper Alpha accident: A postmortem analysis of technical and organizational factors. *Risk Analysis*, 13(2), 215-232. doi: 10.1111/j.1539-6924.1993.tb01071.x
- Patterson, J. M. (2009). *Human error in mining: A multivariable analysis of mining accidents/incidents in Queensland, Australia and the United States of America using the human factors analysis and classification system framework* (Doctoral dissertation, Graduate School of Clemson University). Retrieved from http://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1464&context=all_dissertations
- Pengcheng, L., Li, Z., Guohua, C., & Licao, D. (2010). Study on human error expanded model and context influencing human reliability in digital control systems. *International Conference on E-Product EService and EEntertainment (ICEEE 2010)*, November 79, 2010, Henan, China. doi: 10.1109/ICEEE.2010.5660132
- Persensky, J. J., Lewis, P., & O'Hara, J. M. (2005). Insights into the role of the operator in advanced reactors (BNL-NUREG-75049-2005-CP). *Proceedings of the American Nuclear Society 2005 Winter Meeting*, November 13-17, 2005, Washington, D.C. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/biblio/859888>
- Persensky, J., Boring, R., Le Blanc, K., Hugo, J., Gertman, D., Shaver, E., Braun, C., Oxstrand, J., & Richards, R. (2010). *Alarm system research plan. Milestone deliverable in support of the U.S. Department of Energy's light water reactor sustainability project* (DOE/ID-10-19888). Retrieved from http://www.aami.org/meetings/summits/alarms/Materials/PDFs/Persensky_Wed_3.pdf
- Pew, R. W., Miller, D. C., & Feeher, C. E. (1981). *Evaluation of proposed control room improvements through analysis of critical operator decisions* (EPRI NP-1982). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Pine, S. M., Schulz, K. A., Edman, T. R., Hanson, T. G., Evans, T. G., Gonzalez, W., Smith, D., & Seminara, J. (1982). *Human engineering guide for enhancing nuclear control rooms* (EPRI NP-2411). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Poole, A., & Ball, L. J. (2005). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Current status and future prospects. In C. Ghaoui (Ed.), *Encyclopedia of human computer interaction*. London: Idea Group. Retrieved from <http://alexpoole.info/wp-content/uploads/2010/02/PooleBall-EyeTracking.pdf>

- Potter, S. S., & Woods, D. D. (1991). Event driven timeline displays: Beyond message lists in human-intelligent system interaction. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics "Decision Aiding for Complex Systems"* (pp. 1283-1288), October 13-16, 1991, Charlottesville, VA. doi: 10.1109/ICSMC.1991.169864
- Queirolo, I. (2011). Gestión de alarmas: Un punto clave en la planificación de la seguridad. *Petrotecnia*, Febrero, 72-77. Retrieved from <http://www.petrotecnia.com.ar/febrero2011/sin/Alarmas.pdf>
- Qureshi, Z. H. (2007). A review of accident modelling approaches for complex socio-technical systems. In T. Cant (Ed.), *Safety Critical Systems and Software 2007. Proceedings of the Twelfth Australian Conference on Safety-Related Programmable Systems (SCS 2007)*, 86, 47-59, Adelaide, Australia. Retrieved from <http://crpit.com/confpapers/CRPITV86Qureshi.pdf>
- Qureshi, Z. H. (2008). *A review of accident modelling approaches for complex critical sociotechnical systems* (DSTO-TR-2094). DSTO Defence Science and Technology Organisation, Australia. Retrieved from <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA482543>
- Qureshi, Z. H., Ashraf, M. A., & Amer, Y. (2007). Modeling industrial safety: A sociotechnical systems perspective. In M. Helander, M. Xie, R. Jiao, & K. C. Tan (Eds.), *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1883-1887), December 2-4, 2007, Singapore. doi: 10.1109/IEEM.2007.4419519
- Rankin, W. L., Duvernoy, E. G., Ames, K. R., Morgenstern, M. H., & Eckenrode, R. J. (1983). *Near-term improvements for nuclear power plant control room annunciator systems* (NUREG/CR-3217). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/6168350>
- Rankin, W. L., Rideout, T. B., Triggs, T. J., & Ames, K. R. (1985). *Computerised annunciator systems* (NUREG/CR-3987). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3), 257-266. doi: 10.1109/TSMC.1983.6313160
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering*. New York, NY: North-Holland.
- Rasmussen, J., & Vicente, K. J. (1989). Coping with human errors through system design: Implications for ecological interface design. *International Journal of Man-Machine Studies*, 31, 517-534. doi: 10.1016/0020-7373(89)90014-X
- Rayner, K. (1995). Eye movements and cognitive processes in reading, visual search, and scene perception. In J. M. Findlay, R. Walker, & R. W. Kentridge (Eds.), *Eye movement research. Mechanisms, processes and applications* (pp. 3-22). Amsterdam: North-Holland.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422. doi: 10.1037/0033-2909.124.3.372
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Reason, J. (1997). *Managing the risk of organizational accidents*. Hampshire, UK: Ashgate Publishing Limited.
- Reason, J., Hollnagel, E., & Paries, J. (2006). *Revisiting the Swiss cheese model of accidents* (EEC Note No. 13/06). Eurocontrol Experimental Centre. Retrieved from Eurocontrol website:

- http://publish.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2006/017_Swiss_Cheese_Model.pdf
- Reiersen, C. S., Evjen, O., & Molteberg, G. (1987). *Documentation of an enhanced HALO overview for the NORS simulator* (HWR-171). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Reiersen, C. S., Marshall, E. C., & Baker, S. M. (1987). *A comparison of operator performance when using either an advanced computer-based alarm system or a conventional annunciator panel* (HPR-331). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Reiersen, C. S., Marshall, E. C., Verle, A., & Gertman, D. (1987). *Further evaluation exercises with the Integrated Process Status Overview – IPSO* (HWR-184). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Reising, D. V., Downs, J. L., & Bayn, D. (2004). Human performance models for response to alarm notifications in the process industries: An industrial case study. *Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES)*, 48(10), 1189-1193, September 20-24, 2004, New Orleans, LA, USA. doi: 10.1177/154193120404801009
- Reising, D. V., & Montgomery, T. (2005). Achieving effective alarm system performance: Results of ASM Consortium benchmarking against the EEMUA guide for alarm systems. *Proceedings of the 20th Annual CCPS International Conference*, April 11-13, 2005, Atlanta, GA, USA. Retrieved from ASM Consortium website: <http://www.asmconsortium.net/Documents/2005%20CCPS%20ASM%20Alarm%20System%20Performance%20vs%20EEMUA%20DOC.pdf>
- Rogovin, M., & Frampton, G. T. (1980). *Three Mile Island; A report to the Commissioners and to the public* (NUREG/CR-1250). Vols. 1 & 2. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Roscoe, B. J. (1984). *Nuclear Power Plant Alarm Prioritization (NPPAP). Program status report* (NUREG/CR-3684). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Roscoe, B. J., & Weston, L. M. (1986). *Human factors in annunciator/alarm systems: Annunciator experiment plan 1* (NUREG/CR-4463). Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Roth, E. M., Lin, L., Thomas, V. M., Kerch, S., Kenney, S. J., & Sugibayashi, N. (1998). Supporting situation awareness of individuals and teams using group view displays. *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES). Human-System Interaction: The Sky's No Limit*, 42(18), 244-248, October 5-9, 1998, Chicago, IL, USA. doi: 10.1177/154193129804200313
- Roth, E. M., Mumaw, R. J., & Stubler, W. F. (1992). Human factors evaluation issues for advanced control rooms: A research agenda. *Proceedings of the IEEE 5th Conference on Human Factors and Power Plants* (pp. 254-259), June 7-11, 1992, Monterey, CA, USA. doi: 10.1109/HFPP.1992.283401
- Roth, E. M., Mumaw, R. J., Vicente, K. J., & Burns, C. M. (1997). Operator monitoring during normal operations: Vigilance or problem-solving? *Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES)*, 41(1), 158-162, September 22-26, 1997, Albuquerque, NM, USA. doi:10.1177/107118139704100137

- Roth, E. M., & O'Hara, J. M. (2002). *Integrating digital and conventional human-system interfaces: Lessons learned from a control room modernization program* (NUREG/CR-6749). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1025/ML102571847.pdf>
- Rothenberg, D. H. (2009a). *Alarm management for process control: A best-practice guide for design, implementation, and use of industrial alarm systems*. New York: Momentum Press.
- Rothenberg, D. H. (2009b). Principles and myths of process control alarm management. *Proceedings of the Sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant, Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies* (NPIC&HMIT), April 5-9, 2009, Knoxville, TN, USA.
- Rouse, W. B., & Rouse, S. H. (1983). Analysis and classification of human error. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-13(4), 539-549. doi: 10.1109/TSMC.1983.6313142
- Ruel, M., & Marvan, M. (2008). A safe plant where operators are not overwhelmed by alarms - Is that possible? *Proceedings of 94th Annual Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC) Meeting & EXFOR*, February 5-7, 2008, Montreal, QC. Retrieved from http://www.topcontrol.com/fichiers/en/A_SAFE_PLANT_WHERE_OPERATORS_ARE_NOT_OVERWHELMED_BY_ALARMS_IS_THAT_POSSIBLE_Michel_Ruel_Michael_Marvan_Feb_6_2008_.pdf
- Saarni, R., Førdestrømmen, N. T., Meyer, B. D., & Skjerve, A. B. M. (2001). *Control room MMI 2000 for the NORS simulator in HAMMLAB* (HWR-662). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Salo, L., Laarni, J., & Savioja, P. (2006). Operator experiences on working in screen-based control rooms. *Proceedings of the Fifth ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technology* (NPIC&HMIT), November 12-16, 2006, Albuquerque, NM, USA.
- Salvendy, G. (1987). *Handbook of human factors*. New York: John Wiley and Sons.
- Sebok, A. (2000). Team performance in process control: Influences of interface design and staffing levels. *Ergonomics*, 43(8), 1210-1236. doi: 10.1080/00140130050084950
- Sebok, A. L., Grini, R.-E., Larsen, M., Ness, E., & Sørensen, A. (1998). *The Halden Reactor Project workshop on HAMMLAB 2000* (HWR-503). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Sebok, A., Beere, B., & Chung, K. H. (1999). *Human factors evaluation of the 1998 NORS MMI in HAMMLAB* (HWR-597). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Seminara, J. L. (1988). *Control-room deficiencies, remedial options, and human factors research needs* (EPRI NP-5795). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-5795>
- Seminara, J. L., & Eckert, S. K. (1980). *Human factors methods for nuclear control room design. Volume 4: Human factors considerations for advanced control board design* (EPRI NP-1118-SY). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-1118-V4>
- Seminara, J. L., Eckert, S. K., Seidenstein, S., Gonzalez, W. R., & Stempson, R. L. (1980). *Human factors methods for nuclear control room design. Volume 3: Human factors methods for*

- conventional control board design* (EPRI NP-1118-SY). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-1118-V3>
- Seminara, J. L., Eckert, S. K., Seidenstein, S., Gonzalez, W. R., Stempson, R. L., & Parsons, S. O. (1979). *Human factors methods for nuclear control room design. Summary report* (EPRI NP-1118-SY). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-1118-SY>
- Seminara, J. L., Gonzalez, W. R., & Parsons, S. O. (1976). *Human factors review of nuclear power plant control room design* (EPRI NP-309). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Seminara, J. L., & Parsons, S. O. (1979). *Human factors methods for nuclear control room design. Volume 2: Human factors survey of control room design practices* (EPRI NP-1118-SY). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. Retrieved from EPRI website: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-1118-V2>
- Seo, S. M., Keum, J. Y., Park, G. O., Suh, Y. S., & Park, H. Y. (2007). A method to display massive tile-alarm information on a space-limited display. *Proceedings of IAEA Technical Meeting on Integrating Analog and Digital I&C Systems in Hybrid Main Control Rooms at NPPs*, October 28 - November 3, 2007, Toronto, ON, Canada. Retrieved from IAEA website: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/008/39008903.pdf
- Shahriari, M., Shee, A., & Örtengren, R. (2006). Evaluation of the alarm system in an oil refinery – An improvement approach. *Ergonomia IJE&HF*, 28(1), 53-68. Retrieved from <http://www.degruyter.com/view/ijerg>
- Shaw, J. A. (1993). Distributed control systems: Cause or cure of operator errors. *Reliability Engineering and System Safety*, 39, 263-271. doi: 10.1016/0951-8320(93)90003-H
- Sheridan, T. (1981). Understanding human error and aiding human diagnostic behavior in nuclear power plants. In J. Rasmussen & W. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failures* (pp. 19-35). New York, NY: Plenum Press.
- Shimada, M., Yamamoto, Y., Tani, M., & Kobashi, S. (1996). Development of the newly advanced alarm system for APWR plant. *Proceedings of International Atomic Energy Agency Specialist Meeting on "Experience and improvements in advanced alarm annunciation systems in NPP"* (IAEA-IWG-NPPCI-97/1) (pp. 162-174), September 17-19, 1996, Chalk River, ON, Canada.
- Shneiderman, B. (1992). *Designing the user interface. Strategies for effective human-computer interaction* (2nd ed.). Boston, MA: Addison-Wesley Publ. Co., Reading.
- Siemens (2008). *Alarm management* [White paper]. Karlsruhe, Germany: Siemens AG. Retrieved from Siemens website: http://w3.siemens.com/mcms/process-control-systems/SiteCollectionDocuments/efiles/pcs7/support/marktstudien/Whitepaper_Alarm_Management_EN.pdf
- Siemens (2010). *Setting a new standard in alarm management. How to follow the ISA 18.2 alarm management standard to create a safer and more productive plant*. Alpharetta, GA: Siemens Industry, Inc. Retrieved from Siemens website: https://w3.siemens.com/mcms/process-control-systems/SiteCollectionDocuments/efiles/pcs7/support/marktstudien/WP_Alarm_Management_ISA_18.pdf

- Silva Junior, L. C., Borges, M. R. S., & Carvalho, P. V. R. (2012). Human factors evaluation in nuclear power plant control rooms using a mobile system to support collaborative observation. *Progress in Nuclear Energy*, 55, 93-101. doi: 10.1016/j.pnucene.2011.11.007
- Simpson, G., Tunley, C., & Burton, M. (2003). *Development of human factors methods and associated standards for major hazard industries* (Research Report 081). HSE Books. Retrieved from HSE website: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr081.pdf>
- Skjerve, A. B., & Bye, A. (Eds.) (2011). *Simulator-based human factors studies across 25 years. The history of the Halden Man-Machine Laboratory* (pp. vii-xii). London: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-0-85729-003-8
- Skraaning, G., & Andresen, G. (1999). The function of the alarm system in advanced control rooms: An analysis of operator visual activity during a simulated nuclear power plant disturbance. *Proceedings of Enlarged Halden Programme Group (EHPG) Meeting on Man-Machine Systems Research and High Burn-Up Fuel Performance, Safety and Reliability and Degradation of In-Core Materials and Water Chemistry Effects* (HPR-352), May 24-29, 1999, Loen, Norway. Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Skraaning, G., & Drøivoldsmo, A. (1998). *Data arc – Specification of OPAS and EyeCon computing tools* (MMSR-2639). Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Smith, W. H., Howard, C. R., & Foord, A. G. (2003). Alarms management – Priority, floods, tears or gain?: Introduction to the “Problem”. *Measurement and Control*, 36(4), 109-113. doi:10.1177/002029400303600402
- Sørenssen, A. (1990). *An early fault detection system running on a live power plant* (HWR-261). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Sørenssen, A., Veland, Ø., Farbrot, J. E., Kaarstad, M., Seim, L. Å., Førdestrømmen, N. T., & Bye, A. (2002). *Recommendations to alarm systems and lessons learned on alarm system implementation* (HPR-354). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Sorkin, R. D. (1988). Why are people turning off our alarms? *Journal of the Acoustic Society of America*, 84(3), 1107-1108. doi: 10.1121/1.397232
- Sorkin, R. D. (1989). Why are people turning off our alarms? *Human Factors Bulletin*, 32(4), 3-4.
- Sorkin, R. D., & Woods, D. D. (1985). Systems with human monitors: A signal detection analysis. *Human-Computer Interaction*, 1, 49-75. doi: 10.1207/s15327051hci0101_2
- Stanton, N. A. (1991). Alarm information in fault diagnosis. *Proceedings of IEE Colloquium on Condition Monitoring for Fault Diagnosis* (IEE Digest No. 1991/156) (pp. 9/1-9/5), October 18, 1991, London. Retrieved from <http://0-ieeeexplore.ieee.org/cisne.sim.ucm.es/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=182018&isnumber=4638>
- Stanton, N. A. (1992). *The human factors aspects of alarms in human supervisory control tasks* (Doctoral dissertation, Aston University). Retrieved from <http://eprints.aston.ac.uk/10865/>
- Stanton, N. A. (1994a). Alarm initiated activities. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 93-117). London: Taylor and Francis.

- Stanton, N. A. (1994b). A human factors approach. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 1-10). London: Taylor and Francis.
- Stanton, N. A. (1994c). Key topics in alarm design. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 221-231). London: Taylor and Francis.
- Stanton, N. A. (1995). Modelling human alarm initiated activities: Implications for alarm system design. *Proceedings of IEE Colloquium on Man-Machine Interfaces for Instrumentation* (pp 8/1-8/4), October 23, 1995, London. doi: 10.1049/ic:19951087
- Stanton, N. A. (1996a). Operator reactions to alarms fundamental similarities and situational differences. In N. A. Stanton (Ed.), *Human factors in nuclear safety* (pp. 76-95). London: Taylor and Francis Ltd.
- Stanton, N. (1996b). Simulators: A review of research and practice. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in nuclear safety* (pp. 117-140). London: Taylor & Francis.
- Stanton, N. A., & Baber, C. (1995). Alarm initiated activities: An analysis of alarm handling by operators using text-based alarm systems in supervisory control systems. *Ergonomics*, 38(11), 2414-2431. doi: 10.1080/00140139508925276
- Stanton, N. A., & Booth, R. T. (1990). The psychology of alarms. In E. J. Lovesey (Ed.), *Contemporary ergonomics* (pp. 378-383). London: Taylor and Francis.
- Stanton, N. A., & Stammers, R. B. (1998). Alarm initiated activities: Matching formats to tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 2(4), 331-348. Retrieved from <http://www.erlbaum.com/Journals/journals/IJCE/ijce.htm>
- Stanton, N. A., Booth, R. T., & Stammers, R. B. (1992). Alarms in human supervisory control: A human factors perspective. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 5(2), 81-93. doi:10.1080/09511929208944518
- Stanton, N. A., Harrison, D. J., Taylor-Burge, K. L., & Porter, L. J. (2000). Sorting the wheat from the chaff: A study of the detection of alarms. *Cognition, Technology and Work*, 2(3), 134-141. doi: 10.1007/PL00011496
- Stauffer, T. (2009). You asked: Alarm management. *Canadian Process Equipment and Control News*, December. Retrieved from exida website: http://www.exida.com/articles/CPECN_Dec09_P19.pdf
- Stauffer, T. (2010). Making the most of alarms as a layer of protection. *Proceedings of Safety Control Systems Conference 2010*, May 12-13, 2010, Calgary, Canada. pp. 16. Retrieved from exida website: http://www.exida.com/images/uploads/Making_the_Most_of_Alarms_as_a_Safety_Layer_of_Protection.pdf
- Stauffer, T. (2012). Implement an effective alarm management program. Apply the ISA-18.2 standard on alarm management to design, implement, and maintain an effective alarm system. *Chemical Engineering Progress (CEP)*, July 2012, 19-27. Retrieved from exida website: http://www.exida.com/images/uploads/AlarmManagement_July2012_CEP.PDF
- Stauffer, T., & Clarke, P. (2012). Using alarms as a layer of protection. *Proceedings of 2012 Spring Meeting & 8th Global Congress on Process Safety*, April 1-4, 2012, Houston, TX, USA. Retrieved from exida website: http://exida.com/images/uploads/Alarms_as_Layer_of_Protection_2012.pdf

- Stauffer, T., & Hatch, D. (2009). *Saved by the bell: Using alarm management to make your plant safer*. Retrieved from exida website: <http://www.exida.com/articles/exida%20Whitepaper%20Use%20Alarm%20Management%20to%20Make%20Your%20Plant%20Safer.pdf>
- Stauffer, T., Sands, N. P., & Gunn, D. G. (2010a). Alarm management and ISA-18 – A journey, not a destination. *Proceedings of the 2010 Texas A&M Instrumentation Symposium*. Retrieved from exida website: <http://www.exida.com/articles/Alarm%20Management%20and%20ISA%2018%20-%20A%20journey%20not%20a%20destination.pdf>
- Stauffer, T., Sands, N. P., & Gunn, D. G. (2010b). Get a life (cycle)! Connecting alarm management and safety instrumented systems. *Proceedings of ISA Safety and Security Symposium*, April 29, 2010. New Orleans, LA. Retrieved from exida website: <http://www.exida.com/articles/Get%20a%20Lifecycle%20-%20Connecting%20Alarm%20Management%20and%20Safety%20Instrumented%20Systems.pdf>
- Stewart, T. (1995). Ergonomics standards concerning human-system interaction. Visual displays, controls and environmental requirements. *Applied Ergonomics*, 26(4), 271-274. doi: 10.1016/0003-6870(95)00031-7
- Stewart, T. (2000). Ergonomics user interface standards: Are they more trouble than they are worth? *Ergonomics*, 43(7), 1030-1044. doi: 10.1080/001401300409206
- Strobhar, D., & Harvey, C. M. (2011). How many alarms can an operator handle? *Chemical Processing*, 24-27. Retrieved from <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2011/how-many-alarms-can-an-operator-handle/>
- Stokke, E., & Pettersen, F. (1983). *NORS the full scope research simulator* (HPR-301). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Stubler, W., Higgins, J., & Kramer, J. (2000). *Maintainability of digital systems: Technical basis and human factors review guidance* (NUREG/CR-6636). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003705072.pdf>
- Stubler, W., & O'Hara, J. M. (1996). *Group-view displays: Functional characteristics and review criteria* (BNL Technical report E2090-T4-4-12/94) (Rev. 1). Upton, NY: Brookhaven National Laboratory.
- Stubler, W., & O'Hara, J. M. (1998). When soft controls get slippery: User interfaces and human error. *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES). Human-System Interaction: The Sky's No Limit*, 42(18), 1281-1285, October 5-9, 1998, Chicago, IL, USA. doi: 10.1177/154193129804201801
- Stubler, W. F., O'Hara, J. M., Higgins, J. C., & Kramer, J. (2000). *Human systems interface and plant modernization process: Technical basis and human factors review guidance* (NUREG/CR-6637). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved from NRC website: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003705052.pdf>
- Stubler, W., O'Hara, J. M., & Kramer, J. (2000). *Soft controls: Technical basis and human factors review guidance* (NUREG/CR-6635). Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory

- Commission. Retrieved from NRC website:
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003705030.pdf>
- Suh, S. M., Jang, G. S., Park, G. O., Park, H. Y., & Koo, I. S. (2006). An elastic display method for visualizing and navigating a large quantity of alarms in a control room of a nuclear power plant. In T. Sobh & K. Elleithy (Eds.), *Advances in Systems, Computing Sciences and Software Engineering. Proceedings of International Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering* (SCSS 05) (pp. 1-3), December 10-20, 2005, Bridgeport, CT, USA. Dordrecht, The Netherlands: Springer. doi: 10.1007/1-4020-5263-4_1
- Takeda, K., Aimi, A. H. B. M., Hamaguchi, T., Noda, M., & Kimura, N. (2011). Design method of plant alarm systems on the basis of two-layer cause-effect model. In A. König et al. (Eds.), *Proceedings of the 15th International Conference Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems* (KES 2011), Part 3 (pp. 415-422), September 12-14, 2011, Kaiserslautern, Germany. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-23854-3_44
- Tanarro Sanz, A., & Tanarro Onrubia, A. (2008). Diccionario inglés-español sobre tecnología nuclear. Madrid: Foro de la industria nuclear y Tecnatom, s.a. (2^a ed.). Retrieved from Foro Nuclear website:
<http://www.foronuclear.org/es/publicaciones-y-documentacion/publicaciones/diccionario-tecnologia-nuclear-ingles>
- Tennant, M. (2013). Implementing alarm management per the ANSI/ISA-18.2 standard. *Control Engineering*, September, 8-12. Retrieved from <http://bt.editionsbyfry.com/publication/frame.php?i=176145&p=9&pn=&ver=flex>
- Theureau, J. (1999). Use of nuclear-reactor control room simulators in research and development. In S. Nishida & K. Inoue (Eds.), *Proceedings of 7th Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems* (pp. 425-430), September 16-18, 1998, Kyoto, Japan. Retrieved from <http://www.coursdaction.fr/06-English/1998-JT-C65.pdf>
- Theureau, J. (2000). Nuclear reactor control room simulators: Human factors research and development. *Cognition, Technology and Work*, 2(2), 97-105. doi: 10.1007/s101110050031
- Thunberg, A., & Osvalder, A.-L. (2007a). Design of usable alarm systems. In C. Berlin & L.-O. Bligård (Eds.), *Proceedings of 39th Annual Congress of the Nordic Ergonomic Society (NES) Conference*, October 1-3, 2007, Lysekil, Sweden. Retrieved from http://www.nordiskergonomi.org/nas2007/CD_NES_2007/papers/A105_Thunberg.pdf
- Thunberg, A., & Osvalder, A.-L. (2007b). What constitutes a well-designed alarm system? *Proceedings of Joint 8th IEEE Conference on Human Factors and Power Plants and 13th Annual Workshop on Human Performance/Root Cause/Trending/Operating Experience/Self Assessment* (pp. 85-91), August 26-31, 2007, Monterey, CA, USA. doi: 10.1109/HFPP.1992.283390
- Thunberg, A., & Osvalder, A.-L. (2009). Good practice regarding alarm system design and alarm management strategies for complex process control settings. In L. Norros, H. Koskinen, L. Salo, & P. Savioja (Eds.), *European Conference on Cognitive Ergonomics 2009 (ECCE). Designing beyond the product – Understanding activity and user experience in ubiquitous environments*. (VTT Symposium 258) (pp. 107-110), September 30 - October 2, 2009, Helsinki, Finland. Retrieved from VTT website:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2009/S258.pdf>

- Torralba, B. (1993a). *Rational behind the preliminary top level design proposal of the CASH man-machine interface* (HALARM-NOTE-26). Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Torralba, B. (1993b). *Top level design of the CASH man-machine interface* (HALARM-NOTE-29). Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Torralba, B. (1994a). *Abbreviations and alarm message content arrangement for alarm lists* (HALARM-NOTE-48). Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Torralba, B. (1994b). *Alarm lists for the CASH selective displays* (HALARM-NOTE-55). Unpublished internal document, OECD Halden Reactor Project, Halden, Norway.
- Torralba, B. (2002). *Informe final del CIEMAT en el proyecto del sistema computarizado de alarmas. PIE N° 041.046*. (HFA-CIE-INF-001; DFN/SC-01/IF-02). Documento confidencial, Ciemat, Madrid.
- Torralba, B., & Martínez Arias, R. (2010). *Work practices and new technologies: A review of research and practical experience* (HWR-964). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Torralba, B., Martínez Arias, R., & Solá, R. (2005). The role of advanced alarm systems in NPP control room. *Proceedings of 9th European Congress of Psychology*, July 3-8, 2005, Granada, Spain.
- Torralba, B., Martínez Arias, R., & Solá, R. (2007). An experimental study of operator activity using an advanced alarm system in nuclear power plant control room. *Proceedings of Joint 8th IEEE Conference on Human Factors and Power Plants and 13th Annual Workshop on Human Performance/Root Cause/Trending/Operating Experience/Self Assessment* (pp. 92-97), August 26-31, 2007, Monterey, CA, USA. doi: 10.1109/HFPP.2007.4413187
- Torralba, B., Senent, A., Zamora, S., Manrique, A., González, C., Valdivia, J. C., Muñoz, A., & Rodríguez, J. A. (1997). Design and evaluation of an advanced alarm prototype for light water reactors. *Proceedings of 13th Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA' 97). Volume 3: Complex systems, cognitive ergonomics. Occupational safety. Materials handling* (pp. 201-204), June 29 - July 4, 1997, Tampere, Finland. ISBN: 951-802-190-2.
- Torralba, B., & Zamora, S. (1997). *Informe de validación del prototipo del sistema avanzado de tratamiento de alarmas desde el punto de vista de factores humanos* (IL-SBWR-04). Documento confidencial, Ciemat, Madrid.
- Torralba, B., & Zamora, S. (2000a). *Informe de resultados de validación del sistema computarizado de alarmas para C.N. Almaraz* (DFN/SC-05/OP-00). Documento confidencial, Ciemat, Madrid.
- Torralba, B., & Zamora, S. (2000b). *Informe de resultados de validación del sistema computarizado de alarmas para C.N. Cofrentes* (DFN/SC-04/OP-00). Documento confidencial, Ciemat, Madrid.
- Torralba, B., Zamora, S., & García Marful, M. (2001). *Informe de resultados de verificación del sistema computarizado de alarmas para C.N. Almaraz*. PIE N° 041.046 (DFN/SC-13/OP-99; HFA-CIE-INT-001). Documento confidencial, Ciemat, Madrid.

- Torrallba, B., Zamora, S., Silveira, F., & Blanquer, N. (2001). *Informe de resultados de verificación del sistema computarizado de alarmas para C.N. Cofrentes* (DFN/SC-20/OP-99; HFA-CIE-INT-002). Documento confidencial, Ciemat, Madrid.
- Traub, P., & Hudson, R. (2007). Alarm management strategies on ships bridges and railway control rooms - A comparison of approaches and solutions. *Proceedings of the Royal Institution of Naval Architects (RINA). Human factors in ship design, safety and operation, March, 2007*, London. Retrieved from <http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045591/BMTDSL-Alarm-Management-Strategies-Conpaper-RINA-Mar07.pdf>
- U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2007). *Investigation report - Refinery explosion and fire* (No. 2005-04-I-TX). BP Texas City, TX, USA. Retrieved from <http://www.csb.gov/assets/1/19/csbfinalreportbp.pdf>
- Usher, D. M. (1994). The alarm matrix. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 139-145). London: Taylor and Francis.
- Usher, D. M., & Stallard, J. M. (1997). Alerts in the ship control centre: The potential for expert systems. *Proceedings of IEE Colloquium on Stemming the Alarm Flood* (Digest No. 1997/136) (pp. 6/1-6/4), June 17, 1997, London. doi: 10.1049/ic:19970745
- van der Schaaf, T. W. (1989). Redesigning and evaluating VDU graphics for process control: Cognitive ergonomics applied to the operator interface. In G. Salvendy & M. J. Smith (Eds.), *Designing and using human-computer interfaces and knowledge based systems* (pp. 263-270). Amsterdam: Elsevier.
- VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) (1998). Prozessführung mit Bildschirmen [Process control with screens] (VDI/VDE GMA Standard 3699).
- Veland, Ø., Kaarstad, M., Seim, L. Å., & Førdestrommen, N. T. (2001). *Useful and usable alarm systems: Recommended properties* (HWR-679). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Vicente, K. J. (1996). *Review of alarm systems for nuclear power plants* (CEL 96-04). Toronto, CN: University of Toronto, Cognitive Engineering Laboratory. Retrieved from CEL website: <http://cel.mie.utoronto.ca/wp-content/uploads/CEL96-04.pdf>
- Vicente, K. J. (2007). Monitoring a nuclear power plant. In A. F. Kramer, D. A. Wiegmann, & A. Kirlik (Eds.), *Attention. From theory to practice* (pp. 90-99). New York: Oxford University Press.
- Vicente, K. J., & Burns, C. M. (1995). *A field study of operator cognitive monitoring at Pickering nuclear generating station - B* (CEL 95-04). Toronto: University of Toronto, Cognitive Engineering Laboratory. Retrieved from CEL website: <http://cel.mie.utoronto.ca/wp-content/uploads/CEL95-04.pdf>
- Vicente, K. J., & Burns, C. M. (1996). Evidence for direct perception from cognition in the wild. *Ecological Psychology*, 8(3), 269-280. doi:10.1207/s15326969eco0803_5
- Vicente, K. J., Mumaw, R. J., & Roth, E. M. (1997). *Cognitive functioning of control room operators: Final phase* (CEL 97-01). Toronto: University of Toronto, Cognitive Engineering Laboratory. Retrieved from CEL website: <http://cel.mie.utoronto.ca/wp-content/uploads/CEL97-01.pdf>

- Vicente, K. J., Mumaw, R. J., & Roth, E. M. (2004). Operator monitoring in a complex dynamic work environment: A qualitative cognitive model based on field observations. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(5), 359-384. doi:10.1080/14039220412331298929
- Vicente, K. J., Roth, E. M., & Mumaw, R. J. (2001). How do operators monitor a complex, dynamic work domain? The impact of control room technology. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 831-856. doi: 10.1006/ijhc.2001.0463
- Visuri, P., & Øwre, F. (1982). *Forming and presenting process control alarms using computers – The HALO concept* (HPR-283). Halden, Norway: OECD Halden Reactor Project.
- Voss, T. J. (1997). Current human factors standards development efforts within IEEE. In D. I. Gertman, D. L. Schurman, & H. S. Blackman (Eds.), *Proceedings of the 1997 IEEE Sixth Conference on Human Factors and Power Plants. Global Perspectives of Human Factors in Power Generation* (pp. 3/1-3/6), June 8-13, 1997, Orlando, FL, USA. doi: 10.1109/HFPP.1997.624817
- Wade, W. D. (1980). Simulation for training and decision-making in large-scale control systems. Part 4: Marine-system trainers. *Simulation*, 35(3), 94-97. doi:10.1177/003754978003500304
- Wallin, S. (2009). Chasing a definition of “alarm”. *Journal of Network System Management*, 17, 457-481. doi: 10.1007/s10922-009-9127-3
- Wallin, S., Leijon, V., Nordlander, J., & Bystedt, N. (2011). The semantics of alarm definitions: Enabling systematic reasoning about alarms. *International Journal of Network Management*, 22(3), 181-198. doi: 10.1002/nem.800
- WAN (2001). *Three Mile Island Accident*. Retrieved from <http://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>
- Watts, J. C., Woods, D. D., & Patterson, E. S. (1996). Functionally distributed coordination during anomaly response in space shuttle mission control. *Proceedings of Third Annual Symposium on Human Interaction with Complex Systems* (HICS) (pp. 68-75), August 25-28, 1996, Dayton, OH. doi: 10.1109/HUICS.1996.549494
- Wentink, M., Stassen, L. P. S., Alwayn, I., Hosman, R. J. A. W., & Stassen, H. G. (2003). Rasmussen’s model of human behavior in laparoscopy training. *Surgical Endoscopy*, 17(8), 1241-1246. doi: 10.1007/s00464-002-9140-z
- Westinghouse Electric Corporation (1973). *Systems summary of a Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant*. Pittsburgh, PA: Westinghouse Nuclear Energy Systems.
- Westinghouse Nuclear Española (1983). *Descripción del sistema nuclear de generación de vapor (SNGV) Westinghouse*. Madrid: Westinghouse Nuclear Española.
- Wickens, C. D. (1992). *Engineering psychology and human performance* (2nd ed.). New York: Harper-Collins.
- Wickens, C. D., & Kramer, A. (1985). Engineering Psychology. *Annual Review of Psychology*, 36, 307-348. doi: 10.1146/annurev.ps.36.020185.001515
- Wickens, C. D., Rice, S., Keller, D., Hutchins, S., Hughes, J., & Clayton, K. (2009). False alerts in air traffic control conflict alerting system: Is there a “cry wolf” effect? *Human Factors*, 51(4), 446-462. doi: 10.1177/0018720809344720

- Wilde, L. D., & Reising, D. V. (2011). Alarm management: Wasn't that problem already solved years ago? *Proceedings of Honeywell Users Group 2011. Where Technology Shapes Solutions, Americas Symposium*, June 12-16, 2011, Phoenix, AZ. Retrieved from ASM Consortium website:
http://www.asnconsortium.net/Documents/Alarm%20Management%20Wasnt%20that%20problem%20solved%20years%20ago_DeWildeReising_2011HUGAmericas.pdf
- Wilkinson, J. (2007). HSE view on alarm management revised EEMUA 191 Guide. *Proceedings of Better Alarm Handling. Official European Launch Event for the New 2nd Edition of EEMUA 191. Alarm systems. A Guide to Design, Management and Procurement*, June 21, 2007, Manchester, UK. Retrieved from <http://www.eemua.org/pdf/EEMUA191-Presentations.pdf>
- Wilson, M. (1998). Alarm management and its importance in ensuring safety. *Proceedings of IEE Colloquium on Best Practices in Alarm Management* (Digest No. 1998/279) (pp. 6/1-6/3), March 25, 1998. Retrieved from <http://0-ieeeexplore.ieee.org/cisne.sim.ucm.es/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=670699&isnumber=14697>
- Woods, D. D. (1994). Cognitive demands and activities in dynamic fault management: Abductive reasoning and disturbance management. In N. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 63-92). London: Taylor and Francis.
- Woods, D. D. (1995). The alarm problem and directed fault attention in dynamic fault management. *Ergonomics*, 38(11), 2371-2393. doi: 10.1080/00140139508925274
- Woods, D. D., O'Brien, J., & Hanes, L. F. (1987). Human factors challenges in process control: The case of nuclear power plants. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors* (pp. 1724-1770). New York: John Wiley and Sons.
- Woods, D. D., Patterson, E. S., & Roth, E. M. (2002). Can we ever escape from data overload? A cognitive systems diagnosis. *Cognition, Technology and Work*, 4, 22-36. doi: 10.1007/s101110200002
- Xiao, Y., & Seagull, F. J. (1999). An analysis of problems with auditory alarms: Defining the roles of alarms in process monitoring tasks. *Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 43(3), 256-260, September 27 - October 1, 1999, Houston, TX, USA. doi:10.1177/154193129904300327
- Xiao, Y., Seagull, F. J., Nieves-Khouw, F., Barczak, N., & Perkins, S. (2003). Why are they not responding to our alarms? Another analysis of problems with alarms. *Proceedings of the 47th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (HFES), 47(3), 386-390, October 13-17, 2003, Denver, CO, USA. doi: 10.1177/154193120304700329
- Xiao, Y., Seagull, F. J., Nieves-Khouw, F., Barczak, N., & Perkins, S. (2004). Organizational-historical analysis of the "failure to respond to alarm" problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 34(6), 772-778. doi: 10.1109/TSMCA.2004.836781
- Yang, J. O., & Chang, S. H. (1991). An alarm processing system for a nuclear power plant using artificial intelligence techniques. *Nuclear Technology*, 95(3), 266-271. Retrieved from <http://www.ans.org/pubs/journals/nt/>

- Yin, S., Tan, A., & Helander, M. (2008). Proactive process control monitoring using trends. *Proceedings of 52nd Annual Meeting of the the Human Factors and Ergonomics Society (HFES)*, 52(24), 2003-2007, September 22-26, 2008, New York City, NY, USA. doi: 10.1177/154193120805202418
- Yoshikawa, H. (2005). Human-machine interaction in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 37(2), 151-158. Retrieved from http://www.koreascience.or.kr/search/articlepdf_ocean.jsp?url=http://ocean.kisti.re.kr/download/volume/nuclear/OJRHBJ/2005/v37n2/OJRHBJ_2005_v37n2_151.pdf&admNo=OJRHBJ_2005_v37n2_151
- Yuki, Y. (2002). Alarm system optimization for increasing operations productivity. *ISA Transactions*, 41, 383-387. doi: 10.1016/S0019-0578(07)60095-0
- Zwaga, H. J. G., & Hoonhout, H. C. M. (1994). Supervisory control behaviour and the implementation of alarms in process control. In N. A. Stanton (Ed.), *Human factors in alarm design* (pp. 119-134). London: Taylor and Francis.